



**UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**PROPUESTA DE ALTERNATIVA BIOLÓGICA PARA  
DISMINUIR LA CONTAMINACIÓN DE CIANURO, POR  
LA EXPLOTACIÓN AURÍFERA, EN LAGUNA DE  
COLAS (CVG MINERVEN).**

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

Presentado ante la

**UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO**

Como parte de los requisitos para optar al título de

**INGENIERO CIVIL**

REALIZADO POR

Almedo B, Mariela D.

Rivas C, Luis G.

TUTOR

Ing. Antonio Seijas

FECHA

Abril, 2022.



UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO  
Prolongación Av. Atlántico. Puerto Ordaz.  
Telf.: (0286) 600-02-36 Fax: (0286) 600-02-36

Período: 202225  
NRC: 26994

Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil

## ACTA DE TRABAJO DE GRADO

Ciudad Guayana, 21 de Abril de 2022

Los suscritos profesores: Antonio Seijas Botana, Florencia Cordero Rivero y Henri Uzcategui Uzcategui, integrantes del jurado calificador del Trabajo de Grado intitolado "Propuesta de alternativa biológica para disminuir la contaminación de cianuro por la explotación aurífera en lagunas de colas (CVG Minerven)", elaborado por la bachiller Almedo Brito, Mariela Del Valle, cédula de identidad N° 27077859, para optar al Título de Ingeniera Civil, certifican que, habiendo examinado dicho trabajo, consideramos que es merecedor de la calificación de

diecinueve (19) puntos.

Observaciones:

---

---

Antonio Seijas Botana  
Tutor(a)

Florencia Cordero Rivero  
Jurado



Henri Uzcategui Uzcategui  
Jurado

Secretaría General  
c. c. Escuela



UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO  
Prolongación Av. Atlántico. Puerto Ordaz.  
Telf.: (0286) 600-02-36 Fax: (0286) 600-02-36

Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil

Período: 202225

NRC: 26994

## ACTA DE TRABAJO DE GRADO

Ciudad Guayana, 21 de Abril de 2022

Los suscritos profesores: Antonio Seijas Botana, Florencia Cordero Rivero y Henri Uzcategui Uzcategui, integrantes del jurado calificador del Trabajo de Grado intitolado "Propuesta de alternativa biológica para disminuir la contaminación de cianuro por la explotación aurífera en lagunas de colas (CVG Minerven)", elaborado por el bachiller Rivas Contreras, Luis Guillermo, cédula de identidad N° 27077778, para optar al Título de Ingeniero Civil, certifican que, habiendo examinado dicho trabajo, consideramos que es merecedor de la calificación de diecinueve (19) puntos.

Observaciones:

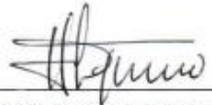
---

---

  
Antonio Seijas Botana  
Tutor(a)

  
Florencia Cordero Rivero  
Jurado



  
Henri Uzcategui Uzcategui  
Jurado

Secretaría General  
c.c. Escuela

## **Dedicatoria**

*Dedico este logro a mis padres Mary Brito y Miguel Almedo por ser mis mejores ejemplos, por creer en mí, por su amor incondicional y mostrarme siempre que las metas se logran con esfuerzo, porque todo lo que soy hoy se los debo a ustedes, me han inspirado a dar lo mejor de mí.*

*A mi abuela Flor Ojeda por su gran apoyo y amor incondicional, por ser un ejemplo a seguir y enseñarme que siempre hay que soñar en grande sin importar las circunstancias.*

*A mi hermano Sebastián Almedo por estar en cada momento de esta maravillosa experiencia, por apoyarme en todo y por siempre estar para mí brindándome su cariño incondicional.*

*Mariela Del Valle Almedo Brito*

## **Dedicatoria**

*Primeramente, a mis padres por darme la vida y enseñarme a vivirla, por otorgarme su apoyo y presencia en cada etapa de la misma, por brindarme la oportunidad de estudiar y de tener todas las comodidades y beneficios que se me han otorgado.*

*Al Sifu. Argimiro Núñez, quien durante 15 años me ha educado sobre las artes marciales, la disciplina y espiritualidad, por llenarme la mente de claridad al tener una respuesta a cada una de mis preguntas e instruirme en cómo enfrentarme a la adversidad. Al Sabonim. Oswaldo González por recibirme en su academia y enseñarme otra variedad de artes marciales, también por las risas compartidas junto a los demás practicantes y compañeros en cada entrenamiento*

*A mi profesora Christine de Madrid, quien ha sido como una segunda madre, por enseñarme nuevamente a hablar, leer y escribir en otra lengua, por inspirarme a aprender más y compartir conmigo sus experiencias e increíbles conocimientos.*

*A Virgilio, Luis, Ricardo, Juan, Jesús y Fabrizio, quienes considero mis hermanos por mantener tantos años de amistad, por los buenos y malos momentos, por las risas, aventuras y consejos que formaron tal vínculo. A mis amigos y compañeros de la universidad Manuel, Levi, Branyelis, Fabiana, Andrea, Mariela, Luciana y Radames por todas esas situaciones a las que nos enfrentamos durante la carrera y logramos superar, por darme su ayuda y permitirme darles la mía, por estar presentes en situaciones de alegría, tristeza y calma.*

*Mis mejores deseos a todos ustedes, los quiero.*

*Luis Guillermo Rivas Contreras*

## **Agradecimientos**

Primeramente, le agradezco a Dios por la paciencia y la fortaleza que han sido para mí la principal motivación para culminar esta importante etapa de mi vida. Además, por guiarme siempre por buen camino y rodearme de personas maravillosas.

A mis queridos padres, Mary Brito y Miguel Almedo; por brindarme su apoyo incondicional y enseñarme a jamás rendirme, que todo en la vida se puede lograr mientras que se proponga. Jamás tendré como recompensar las enseñanzas y valores que me han brindado, no hay forma de demostrar el aprecio que les tengo, los amo.

A mi grandioso hermano, Sebastián Almedo, por haber estado conmigo todo este tiempo de mi preparación académica. Gracias por haberme soportado en todos los momentos, también por enseñarme muchas cosas y hacerme reír todo el tiempo. Te amo, eres el mejor hermano del mundo.

A mis abuelos, Flor Ojeda y Adrián Brito; por mostrarme el lado positivo de todo en la vida, por llenarme de los mejores consejos y apoyarme en todos los momentos. Definitivamente ustedes son las personas más importantes en mi vida y representan la fuente que me impulsa a continuar con mi preparación, los adoro un mundo entero.

A mis tíos, Engels Brito.; Glory Brito.; Eudo Brito.; Dairis Brito.; por creer en mí durante toda mi vida, por apoyarme cuando lo he necesitado y por enseñarme el significado de la unión familiar.

A Fabiana Contreras.; por apoyarme en todo momento y compartir conmigo en los últimos cinco años. No cabe la menor duda que eres una persona super especial con un enorme corazón lleno de alegría y bondad, nunca permitas que nadie te diga lo contrario. Gracias por todo.

A mis grandes amigos, Carelis Bravo.; Ashley Bayeh.; Yaguarin Ruiz.; Adán Rosas.; Luciana Amaya.; Daniel Marín.; por su valiosa amistad, por ser los mejores compañeros durante toda la carrera universitaria, fueron parte de mi crecimiento a nivel académico y personal. Gracias por apoyarme, aconsejarme y vivir todos esos momentos de altos y bajos durante esta grandiosa etapa. Les deseo lo mejor del mundo.

A mis queridas amigas, Camila Herrera.; Daniela Flores.; Genesis Torres.; por ser unas grandes amigas, por apoyarme absolutamente en todo, por escucharme en mis momentos de crisis, por entenderme y darme sus mejores consejos, no tengo las palabras para agradecer lo mucho que han hecho por mí, las quiero un mundo.

A nuestro querido tutor Antonio Seijas, por habernos apoyado incondicionalmente en la elaboración de esta investigación. Gracias por confiar en nosotros y enseñarnos a mejorar en todo momento. Muchas gracias.

A mi compañero, Guillermo Rivas.; por haber aceptado ser mi compañero de tesis al principio de la carrera, gracias por tus enseñanzas, apoyo y consejos. Eres una excelente persona que me ha demostrado lo valioso, y perseverante que puedes llegar a ser; estoy segura que lograras grandes cosas en tu vida y estoy agradecida por haber compartido este trabajo contigo.

A mis amigos, Alfredo Ron y Juan Merchán; por su inmenso apoyo en todo mi último semestre, por sus consejos para ser una mejor persona y la paciencia que brindaron para dar sus mejores explicaciones.

Al señor Mario Ferrante.; por confiar en mí, por ser una orientación en tiempo de crisis, gracias por ofrecerme una mano amiga incondicional, por su inmenso apoyo para tener un pensamiento profesional y hacerme sentir una relación familiar.

*Mariela Del Valle Almedo Brito*

## **Agradecimientos**

En primera instancia, a mi familia por confiar en mí y darme su amor, gracias a ellos puedo cumplir otra meta.

Agradezco profundamente a mi compañera Mariela Almedo quien desde inicios de la carrera me dio su confianza y propuso realizar este trabajo juntos y a pesar de lo difícil no dimos un paso atrás.

En especial a nuestro profesor y tutor Antonio Seijas quien con su valioso conocimiento, paciencia y dedicación nos aceptó como tesisistas y cuya colaboración permitió el desarrollo y culminación el trabajo especial de grado.

A Branyelis quien durante todos estos años de universidad ha sido una persona increíble y me ha acompañado en cada paso de la carrera, cuando se presentan momentos de estrés y crisis sabe cómo darle la vuelta y hacernos reír. Por ser mi confidente y apoyo cuando se trata de temas personales, por aconsejarme cuando me encuentro ante la duda o confusión, por regañarme y gritar cuando es necesario, por darme la oportunidad de pasar más tiempo con ella y demostrarle todo mi aprecio y cariño.

A Luis, por ser alguien en quien realmente puedo confiar. A pesar de que no compartimos muchas ideas, no dejamos de divertirnos y consultarnos sobre cualquier asunto, cada experiencia que lo involucra habla de caer y levantarnos juntos.

A mis amigos Manuel, Levi, Andrea, Fabiana, Luciana y Maryam quienes me apoyaron en momentos difíciles y brindaron su ayuda sin dudarlos.

*Luis Guillermo Rivas Contreras*

# Índice de contenido

Índice de Tablas .....	xiii
Índice de Figuras.....	xiv
Resumen .....	xvi
Introducción.....	17
<b>Capítulo I.....</b>	<b>23</b>
<b>El Problema.....</b>	<b>23</b>
<b>Planteamiento del problema.....</b>	<b>23</b>
Objetivos .....	28
Objetivo general .....	28
Objetivos específicos .....	28
Justificación .....	28
Alcance y limitación .....	30
<b>Capítulo II.....</b>	<b>31</b>
<b>Marco Teórico.....</b>	<b>31</b>
Antecedentes.....	31
Bases teóricas .....	35
Lixiviación con cianuro (NaCN) .....	35
Lagunas de colas.....	36
Tipos de disposicion de relaves (Colas).....	40
Relaves convencionales .....	40
Depósito de relaves espesados.....	41
Depósitos de relaves en pasta .....	42

Depósito de relaves filtrados .....	43
Tratamientos físicos aplicados en las lagunas de colas .....	44
Separación por gravedad .....	44
Centrifugación .....	45
Filtrado o espesado .....	45
Tratamientos químicos aplicados en las lagunas de colas .....	45
Neutralización.....	45
Estabilización y solidificación.....	46
Coagulación y floculación.....	46
Tratamientos biológicos aplicados en las lagunas de colas.....	47
Oro (Au).....	48
Propiedades químicas del oro.....	49
Propiedades físicas del oro.....	49
Propiedades mecánicas del oro.....	51
Cianuro.....	51
Características del cianuro .....	52
Uso del cianuro en la minería de oro .....	54
Cianuración de oro.....	55
Biorremediación .....	57
Biorremediación “IN SITU” .....	59
Bioaumentación .....	59
Biodiscos .....	60
Bases legales.....	63
Terminología básica.....	64

<b>Capítulo III .....</b>	<b>68</b>
<b>Marco Metodológico .....</b>	<b>68</b>
Tipo de investigación .....	68
Diseño de investigación .....	69
Unidad de análisis .....	69
Sistema de variables.....	70
Técnicas e instrumentos de recolección de información.....	75
Análisis documental.....	75
Procedimiento.....	76
<b>Capítulo IV.....</b>	<b>77</b>
<b>Presentación y análisis de resultados .....</b>	<b>77</b>
Describir las alternativas biológicas más favorables derivadas del proceso de las bioaumentación como parte de la biorremediación de agua en las lagunas de colas. .....	77
Pseudomonas alcaligenes.....	79
Pseudomonas Pútida .....	81
Pseudomonas Stutzeri.....	83
Comparar la eficiencia de las bacterias empleadas para la bioaumentación como método biológico en la reducción del impacto ambiental producido por el proceso de laguna de colas.....	85
Seleccionar la alternativa más eficaz para la biorremediación de agua para las lagunas de colas. ....	90
<b>Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>98</b>
Conclusiones.....	98
Recomendaciones .....	100

<b>Referencias .....</b>	<b>102</b>
Anexos .....	112
Anexo A. Planta de cianuración CVG Minerven .....	113
Anexo B. Sistema de Biodiscos rotativos .....	116
Anexo C. Cultivo de bacterias .....	118

## Índice de tablas

Tabla 1. Eliminación de constituyente en procesos biológicos aeróbicos y anaeróbicos. .....	48
Tabla 2. Parámetros óptimos para el desarrollo de los microorganismos .....	58
Tabla 3. Cuadro metodológico del trabajo de grado .....	72
Tabla 4. Valores de las condiciones fisico-químicas halladas en las lagunas de colas de CVG Minerven .....	87
Tabla 5. Valores de las condiciones fisico-químicas incluyendo Oxígeno Disuelto (OD) halladas en las lagunas de colas de CVG Minerven .....	89
Tabla 6. Condiciones óptimas de crecimiento para las Ps. Alcaligenes, Ps. Putida y Ps. Stutzeri .....	89
Tabla 7. Eficiencia para degradar cianuro de sodio de las Ps. Alcaligenes, Ps. Putida y Ps. Stutzeri.....	90
Tabla 8. Condiciones necesarias de un cultivo de laboratorio para la reproducción de pseudomonas Stutzeri .....	94

## Índice de figuras

Figura 1. Proceso de extracción de oro con el método de lixiviación con cianuro..	36
Figura 2. Efluente con cianuro, depositado en las lagunas de colas.	38
Figura 3. Agua en reposo, en las lagunas de colas	39
Figura 4. Lagunas de colas, CVG Minerven, El Callao, Bolívar	39
Figura 5. Lagunas contaminadas de mercurio y cianuro producido de la minería a cielo abierto	40
Figura 6. Disposición de relaves espesados (Método Robinsky).	41
Figura 7. Depósito de relave en pasta	42
Figura 8. Depósito de relaves filtrados.	44
Figura 9. Cianuro total, complejo y libre.	52
Figura 10. Agua en reposo, en las lagunas de colas	56
Figura 11. Planta de cianuración, CVG Minerven, El Callao, Bolívar.	56
Figura 12. Sistema de biodiscos para tratamiento secundario.	61
Figura 13. Típicos Bacillus teñidos y vistos en el microscopio óptico.	78
Figura 14. Acinetobacter vista con un microscopio electrónico	79
Figura 15. Colonia de Pseudomonas Alcaligenes	80
Figura 16. Pseudomonas Alcaligenes y su Flagelo Polar	81
Figura 17. Tinción de Pseudomonas Putida.	82
Figura 18. Pseudomonas Putida.	83
Figura 19. Colonia de Pseudomonas Stutzeri crecidas en placa agar con sangre de caballo.	84
Figura 20. Cepas de Pseudomonas Stutzeri	84
Figura 21. Representación de la ubicación de las lagunas de colas I y II de CVG Minerven.	86
Figura 22. Sistema de biodiscos en fase de mantenimiento	92
Figura 23. Instalación y adecuación del sistema de biodiscos	92

Figura 24. Aplicación de inóculos al sistema de biodiscos. ....	93
Figura 25. Sistema de biodiscos en funcionamiento.....	95
Figura 26. Diagrama de flujo del proceso de producción del oro según propuesta de alternativa biológica. ....	96
Figura 27. Empleo del sistema de biodiscos a partir del agua de la laguna de colas...97	
Figura 28. Lagunas de colas I y II, CVG Minerven .....	114
Figura 29. Planta CVG Minerven, El Callao, Bolívar .....	115
Figura 30. Sistema de biodiscos .....	117
Figura 31. Crecimiento de Pseudomonas pútidas.....	119
Figura 32. Cultivo de Pseudomonas Alcaligenes formando colonias .....	120
Figura 33. Cultivo de Pseudomonas Stutzeri .....	121



**UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**PROPUESTA DE ALTERNATIVA BIOLÓGICA PARA DISMINUIR LA  
CONTAMINACIÓN DE CIANURO, POR LA EXPLOTACIÓN AURÍFERA,  
EN LAGUNA DE COLAS (CVG MINERVEN).**

Autores: Almedo B., Mariela D.  
Rivas C., Luis G.  
Tutor: Seijas B., Antonio E.  
Fecha: Abril, 2022

## **Resumen**

El sur del estado Bolívar es una zona ampliamente conocida por su actividad minera, siendo el oro (Au) uno de los recursos más explotados por empresas como CVG Minerven y cuya extracción se realiza a través de la lixiviación con cianuro ( $\text{CN}^-$ ). Sin embargo, este compuesto químico no se descompone en su totalidad, generando consecuencias devastadoras para el medioambiente y para el ser humano. Es por ello que el objetivo general de esta investigación se centra en proponer alternativas biológicas para disminuir la contaminación de cianuro por la explotación aurífera en las lagunas de colas de (CVG Minerven), mediante el proceso de la Bioaumentación como parte de la Biorremediación para recuperar las zonas afectadas por las partículas tóxicas de este compuesto. Para llevar a cabo la propuesta de este proyecto se realizó una investigación de tipo documental con un diseño documental. Como resultado se observó que el uso de microorganismos tales como las *Pseudomonas alcaligenes*, *Pseudomonas Putida*, y *Pseudomonas Stutzeri* son capaces de degradar el cianuro, a partir del proceso de la Bioaumentación, para recuperar las zonas deterioradas por la contaminación. Siendo la *Pseudomonas Stutzeri* con un porcentaje del 99% la más efectiva para la degradación del cianuro, la misma será implementada con la ayuda de un sistema de biodiscos rotatorios para una mejor distribución en las lagunas de colas.

Palabras claves: oro, cianuro, Bioaumentación, Biorremediación, contaminación, lagunas de colas.

## **Introducción.**

El territorio venezolano cuenta con una alta variedad de minerales presentes en el suelo y el subsuelo, gracias a la evolución geológica de diversas zonas que ha permitido aumentar la producción de materias primas, debido a la diversidad de los depósitos minerales que, posteriormente, son aprovechados en los sectores de la industrialización.

La Región Guayana, característica por la presencia del “Macizo Guayanés” es una de las áreas con mayor índice de explotación minera, debido a la constante extracción de recursos que provienen de yacimientos y minas, destacándose el hierro, bauxita, coltán, níquel, manganeso, mercurio, uranio, y metales preciosos como el platino, diamantes y el oro. Este último es un recurso de gran interés en el estado Bolívar, donde la actividad minera representa una de las principales fuentes de ingreso.

Luego de la nacionalización de esta industria en el año 2011 y la posterior creación del Arco Minero del Orinoco (AMO), en el año 2016, la explotación aurífera se ha expandido e incluso ha sobrepasado los límites legales. Tal como lo establece el informe financiado por la Unión Europea, Flujos de oro en Venezuela, OCDE (2021):

los riesgos vinculados con esos flujos se extienden más allá de los abusos de los derechos humanos y la destrucción del medio ambiente, e incluyen economías delictivas vinculadas con diversas formas de tráfico y blanqueo de capitales, así como con la financiación del terrorismo. (p.7).

Esta situación de inestabilidad, a su vez, ha incrementado los efectos negativos en el ambiente, no solo por la explotación en zonas de conflicto que propician la violencia entre los habitantes de la región, sino también por la utilización de métodos que no favorecen del todo al ecosistema.

Si bien la necesidad de impulsar la explotación aurífera parte del interés por reactivar el sector industrial del país, se estima que en Venezuela se producen alrededor de 75t de oro, anualmente, según OCDE (2021) “Flujos de Oro en Venezuela”, lo que para el año 2021 correspondía a un total de 4.400 millones de dólares.

Para poder realizar el proceso de extracción, empresas como CVG Minerven emplean cianuro como un recurso eficaz para procesar el material aurífero y extraer el oro puro del suelo. Si bien esta es una práctica que ha sido utilizada, durante años, en la industria mineral, las consecuencias ambientales son devastadoras, percibiéndose los daños tanto en el suelo, como en el aire y el agua encontrada en las lagunas de colas, como resultado del acarreo de sedimentos y el alto nivel de toxicidad presente en el cianuro.

Robert E. Morán (1999) en su informe denominado “El cianuro en la minería: algunas observaciones sobre la química, toxicidad y análisis de las aguas asociadas con la minería” establece que el proceso para extraer el oro con cianuro se realiza de la siguiente manera:

En la extracción del oro, una solución diluida de cianuro es rociada sobre el yacimiento triturado, el cuál es colocado en rellenos, comúnmente denominados montículos, o bien, mezclados con el yacimiento en contenedores confinados. El cianuro se adhiere a partículas diminutas de oro para formar un compuesto de cianuro de oro soluble en agua, a partir del cual el oro se puede recuperar posteriormente. (p.2)

Esto ocasiona pérdidas materiales a causa de la destrucción de la vegetación, la modificación de la topografía de los ríos, el aumento del índice de las muertes de especies silvestres y la fauna en general, y el impacto continuo en la calidad de vida de los habitantes que se exponen a enfermedades de alto riesgo debido a la contaminación.

Otro aspecto importante que se ve afectado por la toxicidad ocasionada por el cianuro son las lagunas de colas encontradas en el proceso de lixiviación de oro, donde las mismas corresponde al lugar de almacenamiento estructurado para la disposición del remanente o residuos de dicho proceso, las cuales almacenan todos los desechos y residuos tóxicos resultantes de las transformaciones auríferas, siendo esto muy perjudicial y dañino para la salud de la naturaleza y de los seres humanos.

Si bien el oro forma parte de la realidad que viven las personas en el sur del estado Bolívar, el uso inadecuado de elementos implementados para su extracción ha producido pérdidas invaluable en la naturaleza, la propuesta de establecer métodos alternativos que reduzcan los daños resulta oportuna para contrarrestar los efectos causados por dichos agentes contaminantes.

A pesar de que el cianuro utilizado en la práctica de la extracción aurífera pasa, posteriormente, por un proceso de descomposición, la sustancia no prevalece inocua en su totalidad, sino que permanecen partículas que durante tiempos prolongados se van acumulando hasta ser peligrosas para la fauna y para el ser humano, incentivando el envenenamiento y causando efectos perjudiciales para la salud.

Según el informe: el cianuro en la minería: algunas observaciones sobre la química, toxicidad y análisis de las aguas asociadas con la minería de Robert E. Morán (1999) “algunas de las formas tóxicas de estos compuestos incluyen a los cianuros libres, los complejos metal cianurados, compuestos órgano-cianurados, cloruro de cianuro, cianatos, tiocianatos, cloraminas y amoníaco”.

Debido a la complejidad para detectar estas sustancias tóxicas en el agua y el suelo, y a la falta de seguimiento para monitorear las actividades mineras, las consecuencias ambientales, a pesar de ser una realidad que durante décadas ha sido relatada, pasa desapercibida, como un problema latente que continúa incrementándose pero que muy pocas veces se busca impedir en su totalidad.

Es por ello que las iniciativas centradas en apoyar los programas para beneficiar la recuperación del ecosistema y, de igual manera, mantener el seguimiento de la explotación aurífera sin generar pérdidas son fundamentales para frenar las transformaciones negativas que ha sufrido el medioambiente tras la utilización excesiva del cianuro en la minería.

La biorremediación es una de esas alternativas que promueve el desarrollo sustentable de una actividad minera adecuada, ya que constituye un método eficaz que permite disminuir el impacto ambiental, gracias al aprovechamiento de microorganismos, plantas y enzimas que tienen la función de recuperar las aguas y degradar los efectos tóxicos del cianuro en el ecosistema.

Su objetivo se centra en eliminar todas aquellas partículas que son dañinas, para no solo reducir el índice de contaminación en los espacios sino, además, aprovechar el metabolismo de estos seres vivos como una herramienta para transformar las sustancias tóxicas presentes en las zonas donde se lleva a cabo la extracción del oro y reactivar su condición de purificación del área; de modo que se usen las propiedades de las plantas como un sistema tecnológico dedicado a limpiar el terreno contaminado.

Dentro de las principales ventajas destaca la viabilidad de este método biológico al utilizar bacterias, hongos, plantas y enzimas propias de la naturaleza para inducir su cultivo en las zonas afectadas y de esa forma reducir el impacto negativo.

La propuesta involucra la necesidad de que empresas especializadas en la explotación de minerales, tal como lo es CVG Minerven puedan implementar estas alternativas como herramientas sustentables que contribuyan a mantener la extracción de minerales, pero, a su vez, permitan reducir las consecuencias ambientales.

La vulnerabilidad del ecosistema en el sur del estado Bolívar es una realidad, pero con el establecimiento de métodos biológicos, como la biorremediación, es posible disminuir los daños que genera la minería en la vegetación, en la flora y fauna, y en la salud de los seres humanos.

Con base en lo expresado anteriormente y con la finalidad de contribuir con las alternativas biológicas más favorables para las lagunas de colas, ubicadas en la Empresa CVG Minerven, Estado Bolívar, se organizó en el presente Trabajo de Grado en cuatro capítulos, los cuales se describen de la siguiente manera:

El capítulo I. El problema: Se plantea el problema existente, así como la presentación del objetivo general y los objetivos específicos, de igual forma la justificación del estudio, el alcance y las limitaciones de la investigación.

El capítulo II. Marco teórico: Abarca la recopilación de información, incluyendo los antecedentes de la investigación, como también, se presentan los fundamentos teóricos, las normativas aplicadas y la terminología básica que permite dar a entender términos específicos ajenos al trabajo en cuestión.

El capítulo III. Marco metodológico: En este se encuentra especificado el tipo y diseño de la investigación, la unidad de análisis, variables relacionadas, las técnicas e instrumentación aplicada y el procedimiento que se llevó a cabo para el desarrollo de los objetivos.

El capítulo IV. Presentación y análisis de resultados: Este capítulo contiene el desarrollo de los objetivos planteados en la investigación, el cual cuenta con la descripción de las bacterias necesarias para lograr la biorremediación, la comparación dichas bacterias respecto a las condiciones de las lagunas de colas y, por último, la selección de la bacteria más eficaz para disminuir la cantidad de cianuro existente.

Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones resultado de la investigación, las referencias bibliográficas empleadas y los anexos correspondientes que amplían la información referencial de este trabajo

# Capítulo I

## El Problema

### Planteamiento del Problema

Una de las principales empresas que operan en el sur del estado Bolívar es Corporación Venezolana de Guayana, C.A. (C.V.G) Minerven, constituida a partir del año 1970 durante el mandato del presidente Rafael Caldera. Esta empresa orientada a explotar el material aurífero, con sede en el municipio El Callao, tiene autorización y alcance para llevar a cabo la explotación de 700 toneladas de oro (Au), en un área total de mil hectáreas (1000h), siendo utilizada la lixiviación con cianuro de sodio (NaCN) como principal método de procesamiento. Este es un mecanismo hidrometalúrgico aplicado en la extracción del mineral en cuestión, así como sus concentrados, sobre todo por ser la alternativa más económica a pesar de los múltiples riesgos que conlleva manipular este químico.

CVG Minerven lleva a cabo múltiples procesos para lograr la extracción del oro (Au), partiendo de la realización de un chequeo geológico para ejecutar un mapeo de los minerales, la planificación geológica para poder ejercer un control en la producción de minas, la perforación para poder abrir barrenos con perforadoras manuales y mecanizadas en la propia roca, el transporte de explosivos, tomando en cuenta factores como la superficie y la carga, posteriormente, para iniciar la explosión.

Consecutivamente se procede a realizar el proceso de lavado para eliminar los residuos. Luego se lleva a cabo el acarreo, cargando el material fragmentado por la voladura a los coladeros. Después se inicia la extracción mediante los SKIPS y se procede a comenzar con el transporte a la planta. A partir de ese momento se comienza con la trituración primaria para reducir el mineral, y luego la trituración secundaria a través de la trituradora de cono y la criba vibratoria. Posteriormente, se inicia el proceso de molienda, mediante el cual se reduce y clasifica el mineral para realizar la lixiviación del oro utilizando el cianuro de sodio (NaCN) para disolverlo. De acuerdo a Figueredo (2015) este proceso.

La lixiviación con cianuro ha sido ampliamente aceptada como un excelente método industrial para recuperar oro y plata. Mientras que la lixiviación en pila es una lixiviación por percolación de mineral acopiado sobre una superficie impermeable, preparada para colectar las soluciones.

Después de disolver el oro, se procede a utilizar los espesadores para separar de la pulpa aurífera cianurada el líquido y sólido que proviene de la molienda para iniciar con la lixiviación y el lavado. Luego se realiza la filtración para clarificar y desoxigenar la solución rica utilizando polvo de Zinc (Zn) para separar del líquido, el sólido insoluble. Por último, se realiza la fundición para fusionar el oro a una temperatura de 1064°C y así obtener los lingotes, generando como residuo considerables cantidades de agua, con alto contenido de cianuro las cuales pasan a ser almacenadas en las lagunas de colas (también llamadas relaves) para acelerar su descomposición.

Estas últimas son estructuras destinadas al confinamiento del agua contaminada por el compuesto, que de acuerdo a sus características físicas y químicas es sometido a diversos tratamientos para su posterior transporte y disposición en presas, causes o depósitos.

Para que el proceso de lixiviación sea posible CVG Minerven evidentemente requiere el cianuro como compuesto principal para lograr la extracción del oro, entendiendo que tiene un alto grado de toxicidad a causa de sus características naturales que, por la presencia de átomos de carbono enlazados a un átomo de nitrógeno, por medio de un triple enlace, ocasiona que su composición sea letal para el ser humano, así como para el ambiente, ya que si alguna de las lagunas de colas falla (sea por rompimiento de diques, fallas de taludes o desbordes a causa de precipitaciones), ocasionaría envenenamiento en los cauces cercanos.

Estas consecuencias no solo se pueden evidenciar en un futuro próximo a la explotación minera, sino que pueden verse también a largo plazo, generando en los seres humanos diversos síntomas que van desde la agitación, respiración rápida, dolor de cabeza y debilidad general, hasta fallas cardiovasculares, daño cerebral y envenenamiento severo por cianuro.

La concentración ideal de cianuro yace entre 300 y 500mg por litro de agua, correspondientes al proceso de lixiviación del oro; sin embargo, solo con la ingestión de 50mg de este químico puede fallecer una persona. Esto quiere decir que uno de los principales problemas de este método parte de la emergencia sanitaria que ocasiona la presencia de este compuesto en las aguas y suelos a causa de las lagunas de colas, afectando, de forma directa, no solo a la biodiversidad animal y vegetal, debido a la destrucción de la cadena ecológica, sino también a los seres humanos que acceden a estos recursos para ejercer diversas actividades.

Cuando el cianuro ingresa en el organismo de una persona se genera un proceso que impide que el oxígeno llegue al resto de las células del organismo, a través de los glóbulos rojos, frenando la respiración celular, disminuyendo la oxigenación, trayendo consecuencias severas al ser humano, como la hipoxia citotóxica, que son letales para el organismo.

Su nivel de toxicidad es alto debido a la inhibición del complejo citocromo c oxidasa que bloquea la cadena transportadora de electrones, que es la base de la respiración celular. He allí su letalidad para cualquier organismo vivo.

Además, se producen distintas repercusiones en el agua, aire y suelo, entendiéndose que, a pesar de tener la condición de descomponerse rápidamente con la luz del sol, en casos determinados puede persistir la presencia del químico durante varios años. A través de diversas actividades el cianuro puede combinarse con el hidrógeno, lo que ocasiona que se produzca una fuerte contaminación de la atmósfera, penetrando en los suelos a través de las precipitaciones y llegando así a los ríos y las aguas subterráneas.

Es por ello que tomando en cuenta que este método de lixiviación es utilizado por la empresa CVG Minerven, el cual se va afectado las lagunas de colas debido por la gran cantidad de cianuro, siendo este un agente de alta toxicidad lo que va debilitando los suelos y las paredes encontradas en los relaves de colas (lagunas de colas), llegando a producir un derrame que pueda esparcir el agua contaminada por cianuro que se encuentra almacenada en dicha estructura, ocasionando una gran problemática en la zona sur del estado Bolívar, en el municipio El Callao, se busca proponer, a través de este trabajo de investigación, las alternativas biológicas más eficientes y favorables para la restauración de las áreas afectadas y disminuir el compuesto de las lagunas de colas, altamente nocivo para el medio ambiente y letal para cualquier ser vivo.

Entendiendo esta problemática de las lagunas de colas se considera oportuno señalar las ventajas de la bioaumentación como parte de la biorremediación como método eficaz para recuperar las aguas contaminadas por cianuro y así poder mitigar el impacto ambiental ocasionado por dicha problemática, a partir de la utilización de organismos vivos como enzimas, hongos, plantas y bacterias, siendo considerada como una alternativa apropiada y recomendable a nivel ecológico y económicamente sustentable, estimulando microorganismos propios del ambiente para degradar el agente contaminante, Glazer y Nikaido (1995) señalan que:

La Biorremediación es una tecnología que utiliza el potencial metabólico de los microorganismos (fundamentalmente bacterias, pero también hongos y levaduras) para transformar contaminantes orgánicos en compuestos más simples poco o nada contaminantes, y, por tanto, se puede utilizar para limpiar terrenos o aguas contaminadas.

Las bacterias propuestas para llevar a cabo el proceso de biorremediación por medio de la bioaumentación en los sectores afectados por el uso de cianuro ( $\text{CN}^-$ ) como consecuencia de la minería, en la zona sur del estado Bolívar son las siguientes: *Pseudomonas*, *Bacillus* y *Acinetobacter*, las cuales constituyen como alternativas biológicas, ampliamente, favorables para el tratamiento y la recuperación de las aguas y suelos contaminados.

Es por ello, que por medio de esta investigación se busca dar respuesta a la siguiente interrogante:

¿Cuáles son las alternativas biológicas más favorables para disminuir el impacto ambiental de las lagunas de colas con contenido de cianuro de sodio ( $\text{NaCN}$ ) utilizado por CVG Minerven en la extracción del oro ( $\text{Au}$ )?

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Proponer alternativas biológicas para disminuir la contaminación de cianuro por la explotación aurífera en lagunas de colas (CVG Minerven).

### **Objetivos Específicos**

1. Describir las alternativas biológicas más favorables derivadas del proceso de la bioaumentación como parte de la biorremediación de agua en las lagunas de colas.
2. Comparar la eficiencia de las bacterias empleadas para la bioaumentación como método biológico en la reducción del impacto ambiental producido por el proceso de laguna de colas.
3. Seleccionar la alternativa más eficaz para la biorremediación de agua para las lagunas de colas.

## **Justificación**

Durante décadas la explotación minera ha generado enormes consecuencias ambientales que perjudican no solo las reservas naturales y la biodiversidad de zonas ricas en minerales, como es el caso del sur del estado Bolívar, sino que también afectan de forma directa a las diversas comunidades que dependen de actividades económicas como la pesca y la agricultura, viéndose perjudicadas por las malas condiciones de los suelos y los ríos, a raíz de la contaminación que presentan las lagunas de colas con contenidos de cianuro de sodio (NaCN) que es utilizado en el proceso de lixiviación del oro.

La principal problemática parte del alto grado de toxicidad presente en estas zonas, como consecuencia de la explotación aurífera, siendo imperativo proponer alternativas para reducir sus índices contaminantes.

La minería es una de las principales actividades que sustentan la economía en Venezuela, por lo que presentar un método eficaz y sustentable va a permitir garantizar que la explotación del oro se desarrolle bajo los parámetros legales, correspondientes a la normativa medioambiental, para proteger las reservas naturales, garantizar la preservación de la vida y mitigar el impacto ambiental originado por los residuos en las lagunas de colas.

Las soluciones basadas en la naturaleza para el sector hídrico constituyen una de las mejores y más económicas alternativas para reducir la contaminación en las aguas residuales de CVG Minerven, siendo estas en su gran mayoría infraestructura gris, que en conjunto con la biorremediación sería ideal para disminuir el grado de toxicidad generado por compuestos como el cianuro, mediante la aplicación de procesos biológicos que utilizan organismos como bacterias, plantas, hongos y enzimas.

Frenar la contaminación surgida a partir de la minería es relevante para garantizar la preservación de espacios ecológicamente importantes para el país, siendo el estado Bolívar uno de los más ricos a nivel de flora y fauna silvestre. Es por ello que por medio de la siguiente investigación se buscará proponer métodos biológicos que permitan reducir el impacto del cianuro, permitiendo que la explotación aurífera se realice generando el menor daño posible tomando como principio la política de gestión ambiental de la Universidad Católica Andrés Bello.

## **Alcance y limitación**

Para realizar esta investigación se contará con información precisa, bien sea a partir de fuentes documentales, así como fuentes vivas, con el fin de precisar cuáles son las alternativas biológicas más favorables derivadas del proceso de la bioaumentación como parte de la biorremediación, estudiando tres bacterias las cuales son: *Pseudomona pútida*, *Pseudomona alcaligenes* y *Pseudomona stutzeri*, de modo que se pueda crear una propuesta para reducir el impacto ambiental del cianuro de sodio (NaCN) utilizado en la explotación aurífera emprendida por CVG Minerven, específicamente al sur del estado Bolívar.

Esta propuesta de ingeniería conceptual se llevará a cabo durante el periodo correspondiente a un semestre académico en la Universidad Católica Andrés Bello, extensión Guayana, entre septiembre 2021 y abril 2022.

## Capítulo II

### Marco Teórico

Este capítulo contiene los fundamentos teóricos que permitieron el desarrollo de las variables planteadas, con el propósito de alcanzar los objetivos del presente trabajo investigativo, este capítulo se integró por los antecedentes, las bases teóricas, las bases legales, y por ultimo las terminologías básicas.

#### Antecedentes

Para completar el Trabajo de Grado, se hizo uso de fuentes bibliográficas y trabajos de investigación previamente desarrollados, que pueden profundizar en lo que se va a tratar en este tema de investigación. A continuación, se expresa las ideas de mayor importancia que fueron abarcadas en los respectivos estudios:

Apaza, (2021), desarrollo un trabajo de investigación titulada: *Microorganismos empleados para la biorremediación de efluentes mineros con cianuro*. Planteándose como objetivo principal “Analizar los principales microorganismos empleados para llevar a cabo procesos de biorremediación de efluentes mineros con cianuro”.

Esa investigación indicó la importancia de la búsqueda de un tratamiento que permita la biorremediación de efluentes generados durante los procesos industriales por las explotaciones minera auríferas, cuyas aguas efluentes suelen contener elevadas concentraciones de compuestos cianurados con alta toxicidad, ocasionando impactos altamente significativos en el ecosistema en general. Dando como resultado la posibilidad de desarrollar un proceso de biorremediación eficaz utilizando una amplia

diversidad de microorganismos que se puede emplear como agentes biológicos potenciales, entre las que sobresalen se encuentran las del género de *Pseudomonas* y *Bacillus*.

Para esta investigación se tomará en cuenta el estudio realizado donde permitirá obtener el mejor método para tratar los efluentes procedentes directamente de la empresa minera Minerven, con el objetivo final de buscar la mejor alternativa por medio de los microorganismos para el tratado de dicha agua contaminada.

Correa y Mocha, (2021), en su tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Ambiental en la Universidad Politécnica Salesiana, titulada: *Tratamiento de aguas residuales mediante biodiscos en la planta de beneficio Reina del Cisne, El Pache-Portovelo- El oro*. cuyo objetivo general fue “Evaluar la reducción del cianuro de sodio presente en efluentes mineros a través de biodiscos y las cepas: *Pseudomonas fluorescens* ATCC 49838 y *Trichoderma harzianum*”.

En esta investigación se presentó un estudio experimental para la reducción de las sales de cianuros encontrados en los recursos hídricos ocasionado por la explotación de la actividad minera, puesto a que no existe un tratamiento para el agua residual de dicha procedencia. Para ello se estudió la eficacia de dos cepas en una muestra inicial de 258mg/l del agua residual, esto se llevó a cabo por medio de un sistema de biodiscos para la aplicación de las bacterias obteniéndose resultados eficaces para la reducción de concentración de cianuro.

Para la presente investigación se implementará el mismo sistema de biodiscos mencionado anteriormente para la aplicación de las bacterias con mayor eficacia en la reducción de las concentraciones de cianuros encontrados en las lagunas de colas de la Empresa Minerven, con el fin de un mejor uso y manejo de la cepa para el tratado del agua residual.

Villegas y Briceño, (2019), en su tesis previa a la obtención del título de Ingeniero de Minas en la Universidad Central de Venezuela, titulada: *Propuesta de un plan de gestión para los residuos mineros valorizables, dispuestos en lagunas de colas por la empresa C.V.G. Minerven C.A. Estado Bolívar*. cuyo objetivo general fue “Proponer un plan de gestión para los residuos mineros valorizables, dispuestos en lagunas de colas por la Empresa C.V.G. Minerven C.A, estado Bolívar”.

En esta investigación se presentó un estudio de campo en el que se determinaron las tomas de aguas con posibles fuentes contaminantes dentro de las lagunas de colas y se recolectaron muestras de puntos clave dentro de la zona para ser analizadas posteriormente con ensayos de laboratorio, entre ellos se basaron en el análisis químico para determinar el contenido de oro, cianuro libre, potencial de hidrogeno y composición química a través de FRX y el análisis físico que permitió estudiar la granulometría, densidad, como también se implementaron técnicas de DRX.

De acuerdo con los resultados, el tipo de contaminación más influyente fue el material analizado como residuo minero de tipo relave, derivado del proceso de cianuración, se determinó una concentración de cianuro libre altamente en porcentaje, sobrepasando los límites ambientales permitidos. En función de las características física, química y mineralógicas propias del residuo se planteó un plan de gestión que contempla alternativas para mejorar la disposición de los residuos priorizando la menor afectación ambiental posible. Para esta investigación se sigue el método considerando conceptualmente alternativas de mejora en el proceso de disminución de cianuro almacenado por la Empresa como lagunas de colas.

Cahuana, (2017), en su tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Metalurgista en la Universidad Nacional del Altiplano - Puno, titulada: *Manejo ambiental de efluentes del proceso de cianuración de oro en la planta de beneficio de la corporación minera Ananea S.A.* cuyo objetivo fue “Encontrar cual es el método adecuado para minimizar el contenido de cianuro, para confrontar la toxicidad de los

efluentes del proceso de recuperación del oro de la planta concentrada de la Corporación Minera Ananea S.A.”.

El trabajo tuvo por objetivo minimizar la cantidad de cianuro de aguas residuales mediante un proceso de oxidación con peróxido de hidrogeno coadyuvado con sales de hierro y/o cobre. Con el fin de encontrar mejores resultados en el tratamiento del agua logrando las condiciones óptimas necesarias ambientales para el estudio de dicha agua. Para esta investigación se estudiará una alternativa de tratamiento para el efluente generado en las instalaciones de la Empresa Minerven, consiguiéndose una mejora ambiental, estudiando a su vez si la técnica implementada es factible y económicamente viable para la aplicación como alternativa de tratamiento.

Solórzano, (2011), en su informe final previa a la obtención del título de Ingeniero en Industrias Forestales en la Universidad Nacional Experimental de Guayana, titulada: *Propuesta de un plan de emergencia para la laguna de colas II de la empresa C.V.G Minerven, El Callao, Estado Bolívar*. cuyo objetivo general fue “Formular un plan de emergencia para la Laguna de Colas II de C.V.G Minerven, El Callao, Estado Bolívar”.

En esta investigación se presentó un estudio en la empresa Minerven donde se evalúa los requerimientos y se planifica programas de supervisión y control de variables ambientales ocasionadas por el alto índice de contaminación y toxicidad encontrados en las lagunas de colas, por ende, se determinar un plan de emergencia para la disminución de agentes contaminantes. Para esta investigación se hace uso de dicha información para estudiar los índices y concentraciones de los agentes encontrados como lo son cianuro, mercurio, entre otros, ubicados en las lagunas de colas, con el fin de buscar una alternativa para disminuir las contaminaciones dadas.

Las investigaciones de Apaza, (2021), Villegas y Briceño, (2019), Cahuana, (2017) y Solórzano, (2011), son vistas como ricas fuentes de información para el desarrollo del Trabajo de Grado; es por ello que esta se verá reflejada en el Capítulo II, aportando en la base teórica y terminología básica, ya que abarca elementos clave para la comprensión del tema a revelar.

## **Bases Teóricas**

Las bases teóricas según Veliz (2005) indica que “representan aquellos enfoques o corrientes desarrolladas por autores sobre el tema tratado en la investigación”. (p. 20).

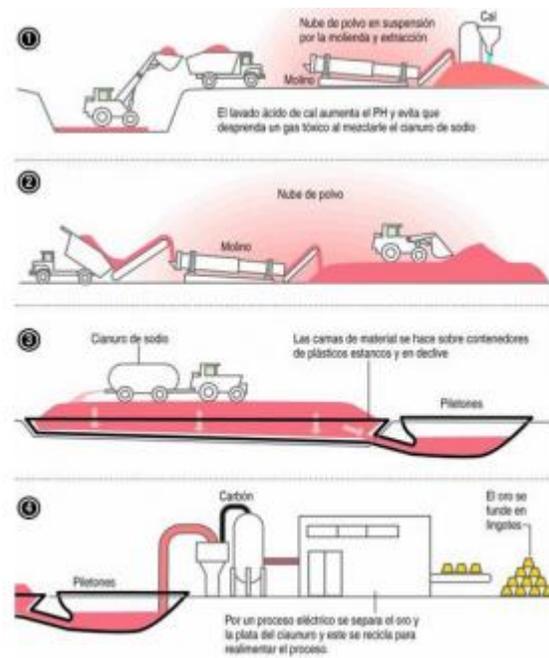
A continuación, se presentan las bases teóricas que fueron necesarias para proponer una alternativa biológica para disminuir la contaminación de cianuro por la explotación aurífera en las lagunas de colas (CVG Minerven).

### **Lixiviación con cianuro (NaCN).**

De acuerdo con la definición establecida en el documento: “Proceso de lixiviación dinámica de minerales auríferos”, presentado como trabajo final de grado en la especialización de ingeniería metalúrgica para la Universidad Nacional del Altiplano Puno la lixiviación es definida de la siguiente manera: como alternativa de tratamiento.

“Consiste en poner en contacto la mena deseada, ya sea previamente triturada y molida con el material directamente de la mina o cancha de acopio de mineral aurífero, con una solución que contiene tanto un agente lixivante (NaCN) como un oxidante (O<sub>2</sub> suministrado por el aire) que disuelve selectivamente el valor metálico contenido en la mena” (p.22).

La lixiviación con cianuro es un método para la extracción de oro, plata, otros. Este permite obtener compuestos cianurados de dichos metales las cuales son solubles en agua y son transportados por ella. A continuación, se observa el procedimiento de lixiviación con cianuro.



*Figura 1.* Proceso de extracción de oro con el método de lixiviación con cianuro. Tomado de Biodegradación de cianuro en aguas y suelos contaminados por la minería de oro, (p. 27), por María Gordillo, 2018, Colombia. Derechos reservados por María Gordillo.

### **Lagunas de colas.**

Tomando en cuenta la conceptualización establecida en el “Glosario Minero del Ministerio de Minas y Energía de la República de Colombia”, (2015), la laguna de cola es definida como una:

Depresión usada para confinar las colas resultantes del proceso de beneficio, y también se constituye como el área cuyo límite más bajo corresponde a un muro o presa de contención, hacia la cual circulan los efluentes provenientes del beneficio, cuya primera función es permitir suficiente tiempo para que las arenas y los metales pesados se sedimenten o para que el cianuro sea destruido antes que el agua "clara" sea descargada o recirculada al molino. (p.89).

Las lagunas de cola corresponden al lugar de almacenamiento estructurado para la disposición del remanente o residuo del proceso de lixiviación del beneficio mineral de las plantas auríferas. Estas lagunas tienen un diseño que permite almacenar el agua y sedimentos contaminados en un espacio confinado, sin llegar a los cauces cercanos, debido a que contienen todos los desechos y residuos tóxicos resultante de las transformaciones auríferas, lo cual son muy perjudiciales y dañinos para la salud de la naturaleza y de los seres humanos.

Los relaves mineros, mayormente conocido como colas, es el lugar donde se encuentran los desechos de los procesos de transformación para la extracción de un mineral sea de una fase, sólida, líquida o gaseosa. Las lagunas se trabajan dependiendo de sus características físico – químico, el cual se someten a varios tratamientos lo que determina la disposición que tienen en presas, depósitos o alternativas de economía. Estas se pueden tratar como lagunas de colas tipo físico o tipo químico, cada una dependerá de los requerimientos medio ambientales como su uso en específico.

Los relaves provenientes del proceso metalúrgico tienen que ser almacenados, adecuadamente, aplicado tecnología ecológicamente racional, económicamente viable, a fin de proteger la integridad física de las personas, el ambiente y medio socio cultural circundante. A pesar de ellos los depósitos de relaves presentan impactos ambientales tanto en fase sólida (los sólidos sedimentados en profundidad) como en fase acuosa (las aguas de salida del depósito de relaves).



*Figura 2.* Efluente con cianuro, depositado en las lagunas de colas. Tomado de Opciones para una minería de oro que cumpla con las normas ambientales en Guayana venezolana, (p. 477), por José Lozada, 2016, Venezuela. Derechos reservados por José Lozada.



*Figura 3.* Agua en reposo, en las lagunas de colas. Tomado de Opciones para una minería de oro que cumpla con las normas ambientales en Guayana venezolana, (p. 477), por José Lozada, 2016, Venezuela. Derechos reservados por José Lozada



*Figura 4.* Lagunas de colas, CVG Minerven, El Callao, Bolívar. Tomado por la aplicación Google Earth, por Mariela Almedo y Luis Rivas, 2022, Venezuela. Derechos reservados por Mariela Almedo y Luis Rivas.



*Figura 5.* Lagunas contaminadas de mercurio y cianuro producido de la minería a cielo abierto. Tomado de *Minería ilegal, la cultura de la muerte que azota el Arco Minero del Orinoco*, por Emmanuel Rondón, 2020, Venezuela. Derechos reservados por Fritz Sánchez.

### **Tipos de disposición de relaves (Colas).**

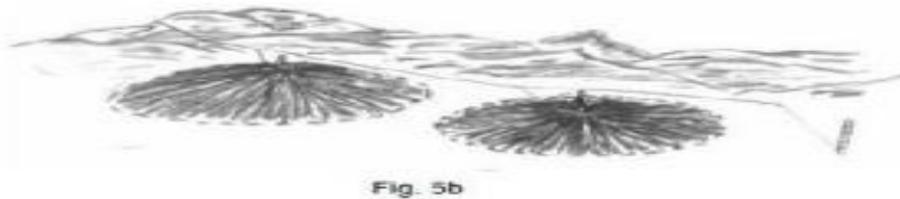
#### ***Relaves convencionales***

Las presas de relaves mineros, son estructuras geotécnicas complejas. Por sus características y de funcionamiento poseen elementos similares y significativas diferencias a las presas de aguas. Deben crecer gradualmente en altura, con los mismos residuos o con otro material de préstamo, al ritmo de producción de residuos de la planta. Los residuos del proceso de extracción, están mezclados con agua, con la consistencia de un lodo, y son bombeados a través de tuberías hacia el depósito (Hernández y Guardado, 2010, p. 1). Mayormente estas colas están centradas en su

funcionamiento geotécnico, condicionado por un conjunto factores constructivos como las lluvias, el clima, la evaporación, la infiltración de aguas subterráneas entre otros factores, lo cual permiten su función dependiendo del sitio.

### *Depósitos de relaves espesados*

Robinsky, E. (1979), desarrolla un sistema de depósito de relaves que no requiere de un dique de arranque para su construcción, conformado por mayor viscosidad de la pulpa del relave consiguiendo una mayor concentración de sólidos obteniendo forma de un cono, proponiendo pendientes que pueden variar desde 2% a 6%, ocupando estos relaves amplias zonas de terreno con poca inclinación lo que resulta ideal para topografía relativamente planas. (p. 12). A continuación, se observa los depósitos de relaves espesado en terrenos horizontales, estos relaves son los comúnmente utilizado para tratar y recuperar el agua contenida en ellos por un sistema piscina especializado en captar el remanente de agua que contiene.



*Figura 6.* Disposición de relaves espesados (Método Robinsky). Tomado de Análisis comparativo entre el método de aguas abajo y suelo reforzado para el recrecimiento de la presa de relaves Viluyo, por Elizabeth Olaya y Brahan Sevillano, 2019, Perú. Derechos reservados por. Elizabeth Olaya y Brahan Sevillano.

### *Depósitos de relaves en pasta*

Son depósitos que contienen gran cantidad de partículas finas teniendo como mínimo un 15% de partículas menores a 20 micrones que presentan una consistencia espesa que no segregable, pudiendo ser transportadas a diferencia de los otros depósitos por tuberías de bombeo y tuberías de gravedad, también pudiendo ser transportadas por camiones cuando se realizan trabajos pequeños y una vez llegando su fin se deja secar para que luego sea acumulado. (Olaya, E. Sevillano, B. 2019). Existen muchos factores positivos y negativos de este tipo de relaves, la recuperación de agua, aceptación ambiental y las actividades de vegetación son factores que incrementan con el uso de estos relaves, en cambio la optimización del suelo, el tamaño y volumen de materiales son reducidos.



*Figura 7.* Depósito de relave en pasta. Tomado de Análisis comparativo entre el método de aguas abajo y suelo reforzado para el recrecimiento de la presa de relaves Viluyo, por Elizabeth Olaya y Brahan Sevillano, 2019, Perú. Derechos reservados por. Elizabeth Olaya y Brahan Sevillano.

### *Depósito de relaves filtrados*

En este sistema el relave pasa por un proceso de filtración con prensas que hace reducir su contenido de agua, teniendo que ser controlado el nivel de saturación que tiene el relave cuando sale de planta, para ser depositado en su lugar de destino a través de camiones, sin que se genere el fenómeno de licuación en su trayecto o también se puede utilizar las fajas transportadoras (Morandé, 2007). Este material tiene que ser compactado trabajando con la curva de compactación, y teniendo como limitaciones que para realizar este proceso de compactación el área de ubicación de la presa no debe estar en temporadas de altas precipitaciones, y así mismo tiene la posibilidad de que ocurran grandes infiltraciones de agua.

Estos depósitos son conocidos por mantener un nivel de humedad menor a los relaves convencionales, lo que permite una mejor compactación para la estabilidad del depósito, debido a su bajo nivel de humedad estos relaves ocupan menor huella de carbono. Un aspecto negativo es que para su construcción se requiere de altos costos debido a los sistemas de filtración. A continuación, una imagen representativa de un depósito de relaves filtrados.



*Figura 8.* Depósito de relaves filtrados. Tomado de Análisis comparativo entre el método de aguas abajo y suelo reforzado para el recrecimiento de la presa de relaves Viluyo, por Elizabeth Olaya y Brahan Sevillano, 2019, Perú. Derechos reservados por Elizabeth Olaya y Brahan Sevillano.

### **Tratamientos físicos aplicados en las lagunas de colas.**

#### ***Separación por gravedad.***

La separación por gravedad aborda distintas técnicas y tecnologías cuyo principal objeto es la separación de oro o de otros minerales, de elementos de poco o de ningún interés. Para ello, se pueden emplear diferentes metodologías que basan sus principios de operación en las fuerzas de gravedad y su interacción con fuerzas hidráulicas, de fricción, diferencias de densidades y/o peso específico (Rivera, 2017). Este tipo de tratamiento es muy usado debido a sus bajos costo y de fácil implementación, consta de agrupar los métodos de separación por gravedad, por corrientes verticales, corrientes superficiales y separación por medios densos para así extraer los excesos de sustancias tóxicas encontradas en las lagunas de colas.

### *Centrifugación*

Todos los fenómenos y fuerzas que interaccionan en la concentración gravimétrica también actúan en la concentración centrifuga, algunos fenómenos son de mayor importancia que otros. Cuando se desea sedimentar partículas finas, es necesario aumentar la fuerza requerida para vencer la resistencia del fluido, fuerza que es conocida como fuerza centrífuga (Alvares, s/f.). Una alternativa para la extracción de oro y tratamiento de las lagunas de colas, exclusivamente para partículas finas, la maquinaria a utilizar depende de la diferencia entre los pesos específicos como también del tamaño y propiedad para la separación requerida.

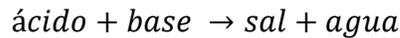
### *Filtrado o espesado*

La pulpa de relave espesado no genera segregación de partículas por decantación (a diferencia de los relaves convencionales), debido a su escasa cantidad de agua, por lo que no se forma una laguna en la superficie, asegurando que la granulometría es prácticamente homogénea en cualquier punto del depósito (Capone, 2009). También se puede denominar como el proceso para el asentamiento de un material sólido o líquido desde un fluido, comúnmente agua o aire trabajado desde su estado de suspensión.

### **Tratamientos químicos aplicados en las lagunas de colas.**

#### *Neutralización.*

Este término se refiere a todos los tratamientos destinados a llevar al agua a un pH próximo a la neutralidad, o bien a un pH próximo al pH de equilibrio, puesto que, inicialmente, el agua puede ser ácida o alcalina (Degrémont, 1979). En otras palabras, se basa en las propiedades de una reacción donde permite neutralizar una base de un ácido, ajustándose en la siguiente ecuación:



### ***Estabilización y solidificación.***

La estabilización se refiere a técnicas que reduce químicamente el potencial de peligro de un desecho convirtiendo los desechos contaminantes en formas menos solubles, móviles o tóxicas. La solidificación se refiere a técnicas que encapsulan los desechos, formando un material sólido, y no implica necesariamente una interacción química entre los contaminantes y los aditivos solidificantes. El producto de la solidificación, a menudo conocido como la forma de desecho, puede ser un bloque monolítico, un material similar a la arcilla, una partícula granular o alguna otra forma física comúnmente considerada “sólida”. (Robles, J. 2020).

Esta técnica se basa en disminuir el área expuesta a la lixiviación, reduciendo los desechos con materiales de baja permeabilidad, el proceso viene dado de una reacción química entre los residuos y los reactivos de solidificación/estabilización en desechos, suelos y lodos con agentes de contaminantes peligrosos.

### ***Coagulación y floculación.***

De acuerdo con Castillo Juversay, (2011), las técnicas de coagulación y floculación

Consiste en la homogenización de la masa coagulada que permitir el incremento y aglomeración de los flóculos recién formados, que tiene como fin aumentar el tamaño e incrementar el peso para precipitar con facilidad. La floculación es beneficiada por la homogenización lenta que permite acumular poco a poco los flóculos; una agitación intensa rompe y raramente se vuelven a formar en su tamaño y fuerzas óptimas (p. 50).

Floculación significa coagular formando copos ó estructuras fibrosas sueltas. Es decir, la floculación, es una parte de la coagulación, que se determina por la formación de una malla tridimensional suelta y porosa, generalmente promovida por la acción de una macromolécula que actúa de puente entre las partículas. Generalmente, el flóculo tiene mayor volumen que su correspondiente coagulo (Ros Moreno, 2014, pág. 226). Para la separación sólido-líquido este viene siendo el método más utilizado con la ayuda de reactivos polímeros lo cual son solubles en agua, para implementar este método se debe conocer las características de los sedimentos encontrados en las lagunas de colas como son tamaño, densidad, resistencia, entre otros.

### **Tratamientos biológicos aplicados en las lagunas de colas.**

Los microorganismos por poseer diversas enzimas son capaces de convertir el cianuro en compuestos de origen natural, incluidos los productos de la minería. Para eso se utiliza a gran escala las bacterias para degradar el cianuro. (Cardona, 2015).

En condiciones aeróbicas, la biodegradación de los cianuros y tiocianato en las aguas residuales, inicialmente produce amoníaco, que se convierte en nitrito y nitrato en presencia de las bacterias nitrificantes, mientras que la biodegradación anaeróbica en condiciones de desnitrificación puede producir nitrógeno. p. (3).

Para la biodegradación de cianuro se utilizan las diversas especies de *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Vibrionacas* y *Enterobacterias*, como también por medio de algas las cuales son *Scenedesmus obliquus*, *Chlorella sp*, entre otras, lo cuales son responsables de la asimilación completa del cianuro presente en aguas residuales mediante la oxidación de cianuro, tiocianato y amoníaco. (Apaza. 2021).

Existen cinco vías diferentes en la biodegradación del cianuro; como la vía hidrolítica, la vía oxidativa, la vía reductora, la vía de sustitución y la vía de síntesis. Las primeras tres vías siguen la conversión de cianuros en moléculas simples (orgánicas o inorgánicas)

y otras dos vías se ocupan de la utilización de cianuro como fuente de carbono y nitrógeno. p. (127-128).

En otras palabras, los tratamientos biológicos por su parte demuestran eliminar cantidades considerables de cianuro de una manera eficiente, económica y viable con el medio ambiente, no provoca efectos adversos en los ecosistemas esto viene dado mediante el proceso aeróbico, el cianuro, el nitrito, el tiocianato y el amoníaco se oxida a nitrato, mientras que, el proceso anaeróbico, el nitrito y el nitrato se eliminan como gas nitrógeno. La eficiencia de estos procesos dependerá de la estabilidad de los compuestos y muchos de los microorganismos utilizados. A continuación, una tabla que nos especifica la eliminación de constituyentes en procesos biológicos aeróbicos y anaeróbicos.

Tabla 1.

*Eliminación de constituyente en procesos biológicos aeróbicos y anaeróbicos.*

Tratamiento biológico aeróbico	Tratamiento biológico anaeróbico
Cianuro	Nitrato
Amonio	Nitrito
Tiocianato	Metales
Nitrito	
Metales	

*Nota:* Tomado de *Microorganismos empleados para la biorremediación de efluentes mineros con cianuro* (p. 128), por Apaza Hugo, Perú. Derechos reservados por Aporte Santiaguino/Hugo Apaza.

Debido a la alta variedad de microorganismo que se pueden emplear como agentes biológicos para los tratamientos de las lagunas de colas que son encargados de disminuir el compuesto contaminante hallado ahí, entre las que sobresalen son las del género *Pseudomonas* y *Bacillus*, brindando mayor eficacia para biorremediar el cianuro, teniendo en cuenta los factores principales para que esto sea posible y que se deba tener en cuenta para lograr altas eficiencia son el pH, temperatura, nutrientes, concentraciones

de ambos componentes como la del microorganismo biorremediador y la concentración del cianuro.

### **Oro (Au).**

Es un metal precioso poco reactivo que forma parte de los metales de transición y según el documento: “Proceso de lixiviación dinámica de minerales auríferos”, es definido de la siguiente manera:

Es un metal amarillo brillante, en láminas muy delgadas es azul o verde, de raya amarillo dorado, en estado natural se denomina oro puro de 24 quilates es sumamente maleable, es demasiado blando para ser usado en joyería y acuñar moneda, por lo que se alea siempre para aumentar su dureza sobre todo su durabilidad tales fines con plata y cobre. (p.30).

### **Propiedades químicas del oro.**

El oro es un metal químicamente inactivo, existe en la naturaleza en las vetas de cuarzo y en depósitos aluviales secundarios, por lo cual se encuentra en su mayor parte en estado natural y en ocasiones como teluro de oro (Ríos, 2012). Una característica importante del oro es que, por sus componentes químicos, se puede trabajar de manera simple con otros minerales, por ejemplo, el oro se alea con gran facilidad con el mercurio. Y por sus composiciones químicas el oro se puede clasificar de distintas maneras.

De acuerdo con lo establecido en el documento: “Refinación de oro por disolución y precipitación selectiva a nivel de laboratorio en la empresa Desminic. S.A., mina La Libertad, Chontales.”, presentado como trabajo final de grado en la especialización de ingeniería química para la Universidad Nacional de Ingeniería, las propiedades químicas del oro son definidas de la siguiente manera:

1. Es fácilmente soluble en agua regia o en otras mezclas que desprenden cloro.
  2. No lo atacan el ácido clorhídrico ni tampoco el ácido nítrico solos.
  3. No lo atacan los álcalis fundidos.
  4. El ácido sulfúrico lo ataca por encima de los 300°C.
  5. El oro es el más “no-reactivo” de todos los metales.
  6. El oro nunca reacciona con oxígeno o sea difícilmente se oxidará o se empañará/
  7. Su peso atómico es 196.97 g/mol
  8. Contiene 79 protones
  9. Posee un electrón en la órbita exterior Diez y ocho electrones en la penúltima órbita
  10. Tiene una forma cristalográfica cúbica central, conteniendo cuatro átomos en los vértices.
- (p.4)

### **Propiedades físicas del oro.**

El documento: “Refinación de oro por disolución y precipitación selectiva a nivel de laboratorio en la empresa Desminic. S.A., mina La Libertad, Chontales.”, definen las propiedades físicas del oro de la siguiente manera:

El oro es uno de los metales más dúctiles y se puede laminar hasta obtener hojas de un espesor de 0.0001mm. Se puede estirar en hilos finísimos, con un gramo se consigue un hilo de 2000 metros de longitud. Sin embargo, tiene escasa tenacidad, un hilo de 2 mm de diámetro se rompe al peso de 68.216 kg.

1. Número atómico: 79
  2. Densidad: 19.32gr/cm<sup>3</sup>
  3. Su punto de fusión es de 1,063°C
  4. Su punto de ebullición es de 2,970°C
  5. Dureza es de 2.5-3 (escala de Mohs).
- (p.4).

En otras propiedades importante se tiene que el oro es un elemento metálico de color amarillo, el cual está constituido por cristales octaédricos, comúnmente son

cristales de forma irregularmente, este se puede encontrar de forma alargada como aplastada.

### **Propiedades mecánicas del oro.**

Como lo indica Giraldo, A. (2013). en su trabajo final de grado “El Oro: de la alquimia a la relatividad”, una de las propiedades mecánicas del oro son las siguientes: “el oro es casi tan blando como el plomo y más que la plata y normalmente se alea para endurecerlo, en estado puro es el más maleable y dúctil de todos los metales, 1 g de oro puede batirse para dar una lámina de 8000 cm<sup>2</sup>, es un metal blando. Un solo grano (0.073 g) de metal se puede estirar en un hilo de 150 m de longitud y una onza oro (35.1 g) que recubra un alambre de plata es capaz de alargarse hasta 1300 m” (p. 12). Gracias a su alta ductilidad, maleabilidad y su resistencia el oro se usa para múltiples funciones y distintos usos.

Como también indica que, “el oro en estado endurecido tiene una dureza de 49 Brinnell, una resistencia a la tracción de 200MPa, un alargamiento del 2% y un modelo de elasticidad de 74 GPa; en estado recocido la dureza es de 28 Brinnell, la resistencia a la tracción es de 120Mpa y el alargamiento del 40%” (p.12).

### **Cianuro.**

Cianuro es un término general que se aplica a un grupo de sustancias químicas que contienen carbono y nitrógeno. Los compuestos de cianuro contienen sustancias químicas (antropogénicas) que se encuentran presentes en la naturaleza o que han sido producidas por el hombre. Existen más de 2000 fuentes naturales de cianuro, entre ellos, distintas especies de artrópodos, insectos, bacterias, algas, hongos y plantas superiores. Las principales formas de cianuro producidas por el hombre son el cianuro de hidrogeno gaseoso y el cianuro solido de sodio y de potasio (Cahuana, 2017).

De los autores previamente citado (Cahuana, 2017) indica además que, “la minería es una actividad industrial que utiliza una cantidad significativa de cianuro, aproximadamente un 20% de la producción total. Desde 1887, las soluciones de cianuro se han utilizado principalmente para extraer oro y plata de material mineral, que de otro modo no podrían extraerse eficazmente. Además, el cianuro se utiliza en concentraciones bajas como un reactivo de flotación para ayudar a recuperar metales base como el plomo, el cobre y el zinc”. (p. 11).

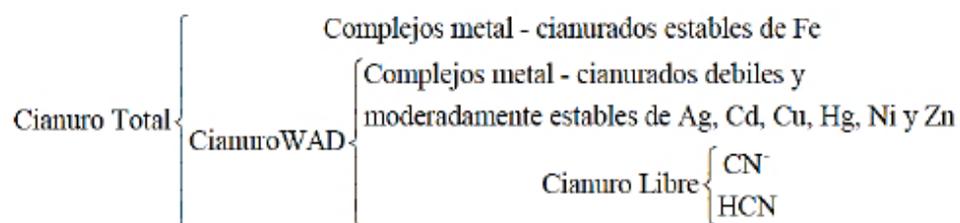
El cianuro es un compuesto químico ampliamente usado en las plantas de tratamiento de minerales de oro para disolver oro y plata, como también se usa en galvanoplastia y baños de limpieza de metales, en el endurecimiento de metales, uso médico, fabricación de acero u otras utilidades, comúnmente en estado sólido, el cual se caracteriza por ser un polvo blanco altamente toxico, pero su fin primordial es para la obtención de oro por lixiviación química, el control de los resultados o de las variables dependerá de la eficacia en la reducción de cianuros de los efluentes provenientes de la planta minera.

### **Características del cianuro.**

El termino cianuro sirve para designar a una familia de compuestos químicos que se caracterizan por la presencia de un átomo de carbono enlazado a un átomo de nitrógeno mediante un enlace triple. La familia del cianuro comprende un grupo de compuestos inorgánicos que se caracterizan por la presencia del grupo  $-C\equiv N$ . los compuestos orgánicos que contienen este grupo se denominan nitrilos. El cianuro puede ser un gas incoloro como el cianuro de hidrogeno (HCN), o el cloruro de cianógeno (CICN), o encontrarse en forma de cristales como el cianuro de sodio (NaCN) o el cianuro de potasio (KCN). (Villegas y Briceño, 2019).

El cianuro se describe con un olor a “almendras amargas”, pero no siempre emana olor y no todas las personas puede detectarlo, además el límite de detección del

olor es cercano a la concentración donde comienza a ser tóxico. El cianuro puede presentarse de muchas formas y la clasificación de estos puede hacerse como sigue: Cianuro total, Cianuro WAD y Cianuro libre.



*Figura 9.* Cianuro total, complejo y libre. Tomado de Propuesta de un plan de gestión para los residuos mineros valorizables, dispuestos en lagunas de colas por la Empresa C.V.G. Minerven C.A. Estado Bolívar, (p. 37), por José L. Villegas y Carlos A. Briceño 2019, Venezuela. Derechos reservados por José L. Villegas y Carlos A. Briceño.

El cianuro es una de las sustancias más usadas en la extracción de oro, principalmente porque es fácil obtenerlo y tiene mayor efectividad en la recuperación de este metal; sin embargo, tiene altos niveles de toxicidad por lo que su uso debe ser controlado para evitar fugas, teniendo que ser reutilizado la mayor cantidad de veces antes de ser eliminado. (Cazar, 2015).

Por otra parte, el cianuro es utilizado en la mayoría de las operaciones mineras industriales. Al agregar cianuro ( $\text{NaCN}$ ) a un lodo aurífero, se produce un compuesto ( $\text{NaAu}((\text{CN})_2)$ ) que luego, en presencia de Zinc ( $\text{Zn}$ ), genera un precipitado ( $\text{Na}_2\text{Zn}((\text{CN})_4)$ ) y oro libre ( $\text{Au}$ ). (Lozada, 2016). Otra característica citada por el mismo autor indica que. “En contacto con la luz del sol y a temperatura ambiente, el cianuro se descompone en otros elementos con muy bajo poder de contaminación” (p. 476).

Por medio de las características encontradas en el cianuro la degradación del mismo por oxidación es un método eficaz para la obtención de resultados favorables, este proceso dependerá de los parámetros o características del cianuro como pH,

concentración de Sulfato Ferroso y otros componentes encontrados en el lugar a tratar. También, debido a sus propiedades únicas, el cianuro se utiliza en numerosos productos orgánicos como para la fabricación de partes metálicas. Este se utiliza en concentraciones bajas como un reactivo de flotación para ayudar a recuperar metales base como el plomo, el cobre y el zinc.

### **Uso del cianuro en la minería de oro.**

El cianuro se utiliza en la industria minera para la extracción de oro porque permite de manera efectiva y eficiente la extracción del oro. Este proceso se denomina cianuración que actualmente sustituye al método de amalgado con mercurio, que es potencialmente contaminante pues carece la asimilación natural en el ecosistema, esta es una característica del cianuro. (Cazar, 2015). Comúnmente para la extracción de oro se utiliza soluciones a base de agua, lo que se denominaría hidrometalurgia, todo proceso para extraer y recuperar los metales como el oro a base de dicha sustancia.

La principal razón por la cual se usa el cianuro para la extracción de oro, es por sus componentes químicos, este permite una excepción a la resistencia del oro dando como resultado una solución que disuelve el oro en un metal precioso. “El cianuro se utiliza en minería para extraer oro (y plata) del mineral, en particular mineral de baja ley y mineral que no puede tratarse fácilmente mediante procesos físicos simples como la trituración y la separación por gravedad”. (Cahuana,2017).

Hoy en día se mantiene en la industria el cianuro como un agente lixiviador del oro, por lo general se usaba el mercurio en su estado líquido para la extracción de oro, pero debido a los altos índices de contaminación e intoxicación este método no era rentable para realizar la recuperación del oro, por lo que se optó por el cianuro siendo más estable, eficaz y sin la necesidad de utilizar otros componentes para realizar la lixiviación de oro.

### **Cianuración de oro.**

El principio básico de la cianuración es aquella en que las soluciones alcalinas débiles tienen una acción directa disolvente para el método de extracción del oro y la plata contenidos en el mineral triturado o molido, la cianuración puede ser de sodio, potasio, esto dependerá de las composiciones químicas del mineral a disolver. Comúnmente se utiliza la cianuración de sodio como compuesto químico para las plantas de tratamiento de oro con el fin de disolver oro y plata.

Las reacciones que tienen lugar durante la disolución del oro en las soluciones de cianuro bajo condiciones normales, han sido establecidas en forma suficientemente definidas. La mayoría de las autoridades en la materia concuerdan en que la ecuación general en que la ecuación global de la disolución es como se muestra a continuación  $4Au + 8NaCN + O_2 + 2H_2O = 4NaAu(CN)_2 + 4NaOH$  En un sistema relativamente simple de este tipo, el oro se disuelve con facilidad y las únicas condiciones que se requieren son que el oro este libre y limpio; que la solución de cianuro, no contenga impurezas que puedan inhibir la reacción y que se mantenga un adecuado abastecimiento de oxígeno a la solución durante todo el proceso de la reacción. (Flores, 2019).

El cianuro es letal, pero, en una planta de procesamiento muy avanzada, podría ser reciclado hasta un 90%; la planta de Minerven (El Callao) se diseñó para recuperar más del 50% de ese compuesto, para luego el cianuro residual sale de la planta y es almacenada en lagunas de colas. (José, 2016, p. 476). A continuación, se observa la planta de cianuración de oro encontrada en la empresa Minerven.



*Figura 10.* Agua en reposo, en las lagunas de colas. Tomado de Opciones para una minería de oro que cumpla con las normas ambientales en Guayana venezolana, (p. 477), por José Lozada, 2016, Venezuela. Derechos reservados por José Lozada



*Figura 11.* Planta de cianuración, CVG Minerven, El Callao, Bolívar. Tomado por medio de la aplicación Google Earth, por Mariela Almedo y Luis Rivas, 2022, Venezuela. Derechos reservados por Mariela Almedo y Luis Rivas.

### **Biorremediación.**

Es todo proceso mediante el cual se busca la recuperación de sitios contaminados empleando organismos (plantas, hongos y bacterias) o enzimas. Su técnica consiste en estimular los microorganismos nativos para degradar el contaminante a compuestos menos tóxicos que forman biomasa y dióxido de carbono (mineralización) (Ulloa E. 2018). Este se puede aplicar para todos los estados de la materia, sólidos los cuales se basan sobre medios contaminados como suelos o sedimentos, como también directamente en lodos o residuos. Otro estado de la materia es el líquido en aguas superficiales, subterráneas y residuales. Por último, en el estado gaseoso lo cual es producido por las emisiones industriales o productos derivados por tratamientos de aguas o suelos.

En otras palabras, la biorremediación es el acto de incorporar, a sitios contaminados, organismos que permitan la aceleración del proceso natural de degradación de sustancias tóxicas lo cual permite transformar dichos compuestos en otros químicamente distintos e inocuos (Di Paola y Vicien, 2010). La biorremediación se basa en la remediación biológica, esencialmente en los organismos vivos, los utilizados mayormente para degradar en forma natural son los microorganismos o vegetales.

Estos pueden definirse como el uso de organismos vivos, en el cual entran los componentes celulares o enzimas libres, todo con el fin de realizar una mineralización, humificación de residuos, transformación parcial o agentes contaminantes, de cierto modo varían los tratamientos debido a que los procesos microbiológicos se pueden desarrollar por medio de aerobios y anaerobios, estos se determinan a través de las bacterias encontradas en el lugar contaminado. La manipulación de los microorganismos también dependerá de los procesos físicos y químicos hallados en las lagunas de colas del contaminante de interés.

Existen características primordiales que permiten que la biorremediación absorba las sustancias orgánicas logrando un desarrollo del microorganismo eficaz. Gordillo, 2018, indica a continuación los parámetros óptimos para el desarrollo de la biorremediación de los microorganismos.

Tabla 2.

*Parámetros óptimos para el desarrollo de los microorganismos.*

Parámetro	Condiciones adecuadas para actividad microbiana
Humedad	25-28% de capacidad de retención de agua
pH del suelo	5.5-8.8
Contenido de Oxígeno	<10% de aire en los espacios de poros
Temperatura (°C)	15-45
Nutrientes	Fosforo y Nitrógeno
Tipo de suelo	Bajo contenido de arcilla y sedimentos
Metales pesados	Total, de 2000 ppm

*Nota:* Tomado de *Biodegradación de cianuro en aguas y suelos contaminados por la minería de oro*. (p. 54), por Gordillo María, Colombia. Derechos reservados por Gordillo María.

Suarez (2013) indica las ventajas de la biorremediación de la siguiente manera:

Mientras que los tratamientos físicos y buena parte de los químicos están basados en transferir la contaminación entre medios gaseoso, líquido y sólido, en la Biorremediación se transfiere poca contaminación de un medio a otro. Es una tecnología poco invasiva y generalmente no requiere componentes estructurales o mecánicos que signifiquen una amenaza para el medio. Comparativamente, es económica viable y al tratarse de un proceso natural, suele tener aceptación por parte de la opinión pública. (p. 22).

Como también define sus desventajas, “La biodegradación incompleta puede generar intermediarios metabólicos inaceptables, con un poder contaminante similar o incluso superior al producto de partida y algunos compuestos contaminantes son tan resistentes que pueden incluso inhibir la Biorremediación. Es difícil predecir el tiempo

de requerido para un proceso adecuado y el seguimiento y control de la velocidad y/o extensión del proceso es dispendioso”. (p.22).

### **Biorremediación “IN SITU”.**

Son los estudios que se realizan en el sitio donde se encuentra el problema. (Ulloa E. 2018). “Consiste en estimular a los organismos que viven en el sitio y que son capaces de reducir o degradar los contaminantes” (p. 15).

### **Bioaumentación.**

Se refiere a la adición de microorganismo degradadores, esto cuando la densidad de microorganismo es muy baja o cuando estos no poseen la capacidad metabólica necesaria o el contaminante es toxico. Pueden ser microorganismos nativos, externos o en pocas ocasiones con microorganismos genéticamente modificados. (Ulloa, 2018). En otras palabras, es un método para introducir microorganismo cultivados en laboratorio dentro de un ambiente contaminado, a fin de mejorar la biorremediación de contaminantes encontrados. Finalmente, la bioaumentación es donde se inocula el sistema con uno o varios microorganismos apropiados.

El tipo de microbios utilizados en la bioaumentación depende que los componentes del suelo y el agua a tratar. Los microbios que se agregan en el sitio para lograr la bioaumentación suelen morir una vez que desaparecen la contaminación y las condiciones necesarias para la biorremediación. Para que sea más efectivo el tratamiento los microbios son acompañados por suplementos nutricional y oxigeno permitiendo abordar con éxito la degradación a escala real de compuestos que por sus características químicas son resistentes. Lo primero que se lleva a cabo por medio de los microorganismos es disminuir la tensión superficial del agua para luego estabilizar las emulsiones entre el agua y el otro liquido (contaminado) descartado los efectos potencialmente nocivos de estas moléculas.

Otras líneas de investigación han llevado a la introducción de microorganismos aclimatados o incluso modificados genéticamente en el medio, con el fin de mejorar la biodegradación. Esta técnica funciona en condiciones de laboratorio o biorreactor, pero en ambientes externos (suelo o agua) su implantación depende de una serie de factores. (Suarez, 2013). Dichos factores se tienen como movilidad y distribución de microorganismo, presencia de materia orgánica, toxinas, nutrientes, condiciones ambientales, entre otros. Estos microorganismos en otras palabras bacterias deben sobrevivir a las condiciones ocupadas en el sitio para lograr con éxito la degradación del contaminante. En general, los ambientes más selectivos y la utilización de consorcios microbianos favorecen la bioaumentación.

### **Biodiscos.**

Uno de los sistemas más recientes para el tratamiento de aguas residuales es el Contador Biológico Rotatorio (CBR) comúnmente conocido como Biodisco.

El biodisco remueve la materia orgánica soluble y coloidal presente en el agua residual, bajo condiciones aeróbicas, es tan eficaz como el proceso de lodos activos, requiere un espacio mucho menor, es fácil de operar y tiene un menor consumo energético. Martínez. (2001), nos indica la descripción del proceso.

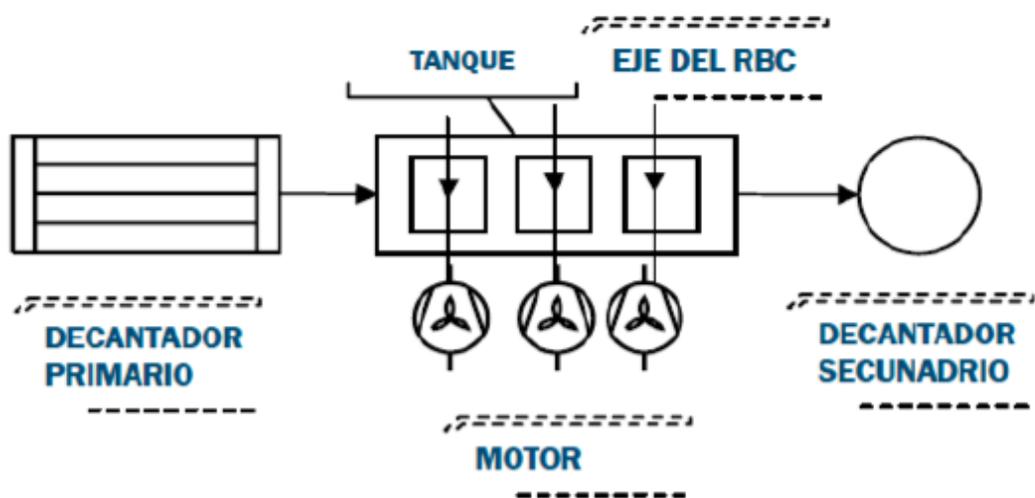
Consiste de una serie de discos de plástico de 3 a 4 m de diámetro, colocados en una flecha (eje) horizontal e instalados en un tanque de concreto. Los discos giran a velocidades entre 1 y 2 r.p.m. y aproximadamente el 40 % del área superficial de los discos esta sumergida en el agua residual que está contenida en un tanque de concreto. Los microorganismos presentes en el agua residual comienzan a fijarse y multiplicarse en la superficie de los discos que se cubre con una película biológica (biomasa) de 2 a 4 milímetros de espesor.

Durante la rotación el reactor acarrea una película de agua residual, la cual absorbe oxígeno del aire. Los organismos de la película fijan de biomasa en los discos, remueven la materia orgánica soluble aeróbicamente, es decir estabilizan la materia orgánica en sustancias

más simples, en presencia de oxígeno. El consumo de oxígeno y la remoción de la materia orgánica se efectúa mientras que el sistema gira a través del agua residual, contenida en el tanque de concreto. (p. 57).

Por último, es conveniente acotar que es un proceso biológico de tratamiento de aguas residuales caracterizados por presentar más del 95% de biomasa activa en forma fija a un soporte. Debido al movimiento rotatorio de los discos, la película biológica alternar su contacto con el agua residual a tratar y con el oxígeno del aire. Cuando la película está en contacto con el aire absorbe oxígeno del mismo, mientras que cuando esta sumergida absorbe el contenido en material soluble a degradar. (Correa y Mocha, 2021).

Cuando la biomasa adherida ingresa a las aguas residuales, el exceso de sólidos y desechos se eliminan del vehículo como desechos. Estos desechos se llevan a lo largo de la corriente de aguas residuales al estanque de sedimentación para su tratamiento. Un tratamiento biológico o llamado también tratamiento secundario, tiene como objetivo degradar la materia orgánica presente en el agua residual dado por la acción de microorganismos, A continuación, un esquema del sistema de biodiscos.



*Figura 12.* Sistema de biodiscos para tratamiento secundario. Tomado de Tratamiento de aguas residuales mediante biodiscos en la planta de beneficio reina del cisne, el

pache-Portovelo-el oro, (p. 61), por Boanerges Correa y Joseph Mocha, 2021, Ecuador. Derechos reservados por Boanerges Correa y Joseph Mocha.

Martínez. (2001). Nos indica que el biodisco presenta numerosas ventajas en comparación con otros sistemas de tratamiento biológico.

En el sistema de tratamiento con biodiscos no existen problemas de ruido, además puede eliminarse la sedimentación del agua antes de entrar al biodiscos, lo cual no afecta la capacidad de remoción de la demanda bioquímica de oxígeno.

Los biodiscos se recuperan más rápido de la entrada de tóxicos al proceso que cualquier otro proceso biológico (lodos, filtros, RAFA, etc.).

No se necesita equipo de retro lavado, porque la rotación de los discos sumergidos en el agua residual, eliminan el exceso de biomas que se adhiere a los discos.

El requerimiento de área de tratamiento es menor, lo que constituye la ventaja principal del biodiscos con respecto a los demás sistemas de tratamiento biológicos, en los que en muchos casos se requiere grandes extensiones para el tratamiento. (p. 59).

También, Martínez. (2001). Nos indica las desventajas.

El proceso es relativamente nuevo y no hay parámetros de diseño definidos.

El proceso C.B.R requiere un tiempo muy largo para alcanzar la estabilidad.

El costo del sistema es bastante elevado por tener que importarse de otros países como E.U.A y México.

Por presentar tres fases: gaseosa, líquida y sólidos es difícil definirlo con un modelo matemático simple (p. 59).

## Bases legales

El interés que genera el tema de la contaminación por cianuro también está fundamentado en la ley. De allí que se tomó en cuenta el Decreto 883, (1995), Venezuela, Gaceta Oficial N.º 5.021. Normas para la Clasificación y el Control de la Calidad de los Cuerpos de Agua y Vertidos o Efluentes Líquidos, específicamente el artículo número 10, que establece lo siguiente:

Artículo 10: A los fines de este Decreto se establecen los siguientes rangos y límites máximos de calidad de vertidos líquidos que sean o vayan a ser descargados, en forma directa o indirecta, a ríos, estuarios, lagos y embalses:

<b>Parámetros Físico-químicos</b>	<b>Límites máximos o rangos</b>
Aceites minerales e hidrocarburos	20 mg/l
Aceites y grasas vegetales y animales	20 mg/l
Alkil mercurio	No detectable (*)
Aldehídos	2,0 mg/l
Aluminio total	5,0 mg/l
Arsénico total	0,5 mg/l
Bario total	5,0 mg/l
Boro	5,0 mg/l
Cadmio total	0,2 mg/l
Cianuro total	0,2 mg/l
Cloruros	1000 mg/l
Cobre total	1,0 mg/l
Cobalto total	0,5 mg/l
Color real	500 unidades de Pt-Co
Cromo total	2,0 mg/l
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5,20</sub> )	60 mg/l
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	350 mg/l
Detergentes	2,0 mg/l
Dispersantes	2,0 mg/l
Espuma	Ausente
Estaño	5,0 mg/l
Fenoles	0,5 mg/l
Fluoruros	5,0 mg/l
Fósforo total (expresado como fósforo)	10,0 mg/l
Hierro total	10 mg/l
Manganeso total	2,0 mg/l
Mercurio total	0,01 mg/l
Nitrógeno total	40 mg/l

(expresado como nitrógeno)	
Nitritos + nitratos (expresado como nitrógeno)	10 mg/l
PH	6-9
<b>Parámetros Físico-químicos</b>	<b>Límites máximos o rangos</b>
Plata total	0,1 mg/l
Plomo total	0,5 mg/l
Selenio	0,05 mg/l
Sólidos flotantes	Ausentes
Sólidos suspendidos	80 mg/l
Sólidos sedimentables	1,0 ml/l
Sulfatos	1.000 mg/l
Sulfitos	2,0 mg/l
Sulfuros	0,5 mg/l
Zinc	5,0 mg/l
<b>Biocidas</b>	
Organoclorados	0,05 mg/l
Organofosforados y Carbamatos	0,25 mg/l
<b>Radiactividad</b>	
Actividad	0,1 Bq/l
Actividad	1,0 Bq/l

(p. 16-18)

Del artículo citado anteriormente, se tomaron en consideración los límites del Cianuro total.

## Terminología básica

**Aerobios:** Organismo que necesita respirar oxígeno para vivir o desarrollarse (Gordillo, 2018, p. 14).

**Agente lixivante:** Sustancias química (cianuro, tiourea, ácido) que tiene la propiedad de disolver selectivamente uno o más elementos presentes en una roca o mineral. (Glosario Técnico Minero, 2015, p. 7).

**Anaerobios:** Organismo que es capaz de vivir o desarrollarse en un medio sin oxígeno. (Gordillo, 2018, p. 14).

**Biolabranza:** Consiste en airear el suelo almacenado en montones y ahí mismo agregar agua y fertilizantes. (Iturbe,2010, p. 18).

**Biolixiviación:** Proceso de lixiviación en el cual la disolución del metal de interés es promovida por la acción de un microorganismo viviente presente en el medio acuoso. (Glosario Técnico Minero, 2015, p. 21).

**Biomasa:** Masa de microorganismos, generalmente bacterias. (Martínez, 2001, p. 59).

**Biopilas:** Consiste en formar pilas con el suelo contaminado y estimular la actividad microbiana, agregando aire, agua y fertilizantes. (Iturbe,2010, p. 17).

**Cianuración:** Método para extraer oro o plata a partir de un mineral triturado o molido, mediante disolución en una solución de cianuro de sodio o potasio. (Glosario Técnico Minero, 2015, p. 31).

**Colas:** Material resultante de procesos de lixiviación y concentración de minerales que contiene muy poco metal valioso. Pueden ser nuevamente tratadas o desechadas. (Glosario Técnico Minero, 2015, p. 34).

**DBO:** Cantidad de oxígeno que demandan o consumen los microorganismos, al estabilizar la materia orgánica. Es un parámetro usado para medir la contaminación orgánica de las aguas. (Martínez, 2001, p. 59).

**Efluente:** Líquido residual que fluye de una instalación (Iguaran y D' Angelo, 2019, p. 53).

**Enzimas:** Moléculas de naturaleza proteica que catalizan reacciones químicas, siempre que sean termodinámicamente posibles. (Gordillo, 2018, p. 14).

**Hidrometalurgia:** Rama de la metalurgia que cubre la extracción y recuperación de metales usando soluciones líquidas, acuosas y orgánicas. (Gordillo, 2018, p. 14).

**Inocular:** Introducir artificialmente una porción de muestra en un medio adecuado, con el fin de iniciar un cultivo microbiano, para su desarrollo y multiplicación. (Garibaldi, 2009, p. 2).

**Lixiviación:** Proceso hidrometalúrgico mediante el cual se realiza la disolución selectiva de los diferentes metales que contiene una mena, por medio de una solución acuosa que contiene un reactivo químico apropiado. (Glosario Técnico Minero, 2015, p. 39).

**Materia orgánica:** Son una fuente de complejos recursos que varían química y morfológicamente, en interacción con la microflora y fauna del suelo encargados de la descomposición y mineralización, ejemplo: el carbono y el nitrógeno. (Julca, 2006, p. 1).

**Microorganismos:** Organismo microscópico animal o vegetal. (Gordillo, 2018, p. 14).

**Minería:** Actividad de explotar las minas para extraer minerales. (Gordillo, 2018, p. 14).

**M.S.N.M:** Metros sobre el nivel del mar.

**Reactor de mezcla completa:** Es un recipiente tipo tanque, el cual debe mantenerse agitado todo el tiempo que esté funcionando. Este tipo de reactores poseen una entrada de reactivos y una salida de productos constante, existiendo una homogeneidad en cualquier punto dentro del tanque, lo que facilita la reacción química que se produce en su interior. (Montserrat, 2010, p.15)

**r.p.m:** Revoluciones por minuto.

**SKIPS:** Medio de transporte vertical de personas o materiales en el interior de una mina; en la parte inferior suele tener un receptáculo (skip) para elevar el material de mena y, eventualmente, el estéril. (Glosario Técnico Minero, 2015, p. 88).

**SSVLM:** Sólidos en suspensión volátiles en el licor mezcla, es una medida aproximada de la cantidad de microorganismos presentes en un aerador, el SSVLM a utilizar es de 3500 mg/l. (Metcalf y Eddy, 1996, p.673).

**Tiempo de retención celular:** Es el número de días que las bacterias o la masa de bacterias permanecen en el tren de tratamiento secundario. (Sela, 2021, p.2)

## Capítulo III

### Marco Metodológico

#### Tipo de investigación

El siguiente trabajo de Grado se considera una investigación de tipo documental que, de acuerdo a Riskey y Col. (2002), “tiene como propósito la revisión de fuentes documentales recolectando, evaluando, verificando y sintetizando evidencias de lo que se investiga, con el fin de establecer conclusiones relacionadas con los objetivos de investigación” (p. 40).

A su vez, Pereira (2004) identifica este tipo de investigación documental como:

“Aquella que se realiza, como su nombre lo indica, apoyándose en fuentes de carácter documental, esto es, en documentos de cualquier especie. Como subtipos de esta investigación se encuentra la investigación bibliográfica, hemerográfica, la archivista; la primera se basa en la consulta de libros, la segunda en artículos o ensayos tanto de revistas como de periódicos, la tercera en documentos que se encuentran en los archivos, como cartas, oficios, circulares, expedientes, etcétera”. (p.139).

En referencia a la metodología señalada anteriormente, la investigación planteada en el Trabajo de Grado corresponde a estudiar diferentes alternativas en el proceso de disminución de cianuro encontrada en las lagunas de colas en la Empresa Minerven, tomando información de documentos ya presentes, para llevar a cabo una conclusión con la mejor solución relacionada a la problemática existente.

## **Diseño de la investigación**

El diseño de investigación se define de la siguiente manera, según Sabino (2000) el objeto del diseño de investigación es proporcionar un modelo de verificación que permita contrastar hechos con teorías, y su forma es la de una estrategia o plan general que determina las operaciones necesarias para hacerla. (p. 91).

Del mismo modo, Arias (2012), “El diseño de investigación es la estrategia general que adopta el investigador para responder al problema planteado. En atención al diseño, la investigación se clasifica en: documental, de campo y experimental” (p. 24). El autor antes citado expresa que:

La investigación documental es un proceso basado en la búsqueda, recuperación, análisis, crítica e interpretación de datos secundarios, es decir, los obtenidos y registrados por otros investigadores en fuentes documentales: impresas, audiovisuales o electrónicas. Como en toda investigación, el propósito de este diseño es el aporte de nuevos conocimientos. (p. 27).

El estudio adopta un diseño de investigación documental, debido a que para el cumplimiento de los objetivos planteados se requiere de la recolección y uso de documentos existentes como trabajos de grado, documentos legales, documentos fotográficos y documentos técnicos con el fin de abarcar la información necesaria para la realizar la presente investigación.

## **Unidad de análisis**

Según Corbetta (2003) "La unidad de análisis es una definición abstracta, que denomina el tipo de objeto social al que se refieren las propiedades. Esta unidad se localiza en el tiempo y en el espacio, definiendo la población de referencia de la investigación" (p. 87).

Con referencia a lo que indica Corbetta, la unidad de análisis de esta investigación se constituye por las alternativas estudiadas para disminuir la cantidad de cianuro encontrado en las lagunas de colas de la Empresa Minerven, esto con el fin de reducir el contenido altamente tóxico logran minimizar el impacto ambiental.

## **Sistema de variables**

Según Sabino (2002) se entiende por variable “cualquier característica o cualidad de la realidad que es susceptible de asumir diferentes valores; es decir que se puede variar, aunque para un objeto determinado que se considere pueda tener un valor fijo” (p. 52)

En el siguiente Trabajo de Grado, se hace uso de un proceso mediante el cual las variables se transforman en conceptos o términos menos complejos y de mayor medición, este, se conoce como operacionalización de variables (Arias, 2012).

Para llevar a cabo el objetivo principal donde se establece proponer alternativas biológicas para disminuir la contaminación de cianuro por la explotación aurífera en lagunas de colas (CVG Minerven), fue necesario estudiar un conjunto de variables para el desarrollo de la propuesta conceptual. Las variables mencionadas son las siguientes:

- Alternativas biológicas más favorables derivadas del proceso de la bioaumentación en lagunas de colas.
- Eficacia de las bacterias empleadas para la bioaumentación como método biológico en la reducción del impacto ambiental producido por el proceso de lagunas de colas.
- Alternativa más eficaz para la biorremediación de agua para las lagunas de colas.

Teniendo en cuenta lo indicado, se elaboró de un cuadro metodológico en el que se detallan los componentes claves identificados en cada uno de los objetivos de este trabajo que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.

*Cuadro metodológico del Trabajo de Grado.*

Objetivo	Variable	Dimensión	Indicador	Técnica	Instrumento	Ítems	Fuente
Describir las alternativas biológicas más favorables derivadas del proceso de la bioaumentación de agua en las lagunas de colas.	Alternativas biológicas más favorables derivadas del proceso de la bioaumentación en lagunas de colas.	Describir las bacterias que más favorecen dependiendo de las condiciones requeridas para lograr la degradación del cianuro.	Condiciones a describir de las bacterias: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Temperatura.</li> <li>- Nutrientes.</li> <li>- pH.</li> <li>- Concentración de cianuro.</li> </ul>	Análisis de contenido.	Análisis documental.	No Aplica.	Material bibliográfico.

Tabla: Continuación

*Cuadro metodológico del Trabajo de Grado.*

Objetivo	Variable	Dimensión	Indicador	Técnica	Instrumento	Ítems	Fuente
Comparar la eficiencia de las bacterias empleadas para la bioaumentación como método biológico en la reducción del impacto ambiental producido por el proceso de laguna de colas.	Eficacia de las bacterias empleadas para la bioaumentación como método biológico en la reducción del impacto ambiental producido por el proceso de lagunas de colas.	Describir las condiciones de las lagunas de colas ubicadas en la empresa Minerven, El Callao.  Elaboración de un cuadro comparativo con las condiciones de las bacterias con las encontradas en las lagunas de colas.	Condiciones a describir de las lagunas de colas: - Temperatura. - Nutrientes. - pH. - Concentración de cianuro.  Condiciones a comparar por medio de las bacterias y las lagunas de colas: - Temperatura. - Nutrientes. - pH. - Concentración de cianuro.	Análisis de contenido.	Análisis documental.	No Aplica.	Antecedentes  Material bibliográfico.

Tabla: Continuación

*Cuadro metodológico del Trabajo de Grado.*

Objetivo	Variable	Dimensión	Indicador	Técnica	Instrumento	Ítems	Fuente
Seleccionar la alternativa más eficaz para la biorremediación de agua para las lagunas de colas.	Alternativa más eficaz para la biorremediación de agua para las lagunas de colas.	Determinar la bacteria más eficaz para la degradación del cianuro cumpliendo con los requerimientos necesarios para que esta sea efectiva.	Selección de comparación.	Análisis de contenido.	Análisis documental.	No Aplica.	Material bibliográfico.

## **Técnicas e instrumentos de recolección de información**

Para definir las técnicas e instrumentos de recolección de información se debe tener clara la definición del mismo, de acuerdo con Arias (2012) la técnica de investigación es “el procedimiento o forma particular de obtener datos o información” (p.67), al mismo tiempo define instrumentos como “cualquier recurso, dispositivo o formato (en papel o digital), que se utiliza para obtener, registrar o almacenar información” (p.68).

Las técnicas e instrumentos a utilizar en el presente trabajo, son las siguientes:

### **Análisis documental**

Se hará una búsqueda de documentación para realizar un análisis documental, de acuerdo con Bernal (2006), establece una definición de las técnicas de análisis documental donde expresa lo siguiente:

Consisten en la descripción de cómo se hará el procesamiento de los datos, que en primera instancia conlleva una descripción de las tablas a desarrollar y la estadística a usar; y para la tesis definitiva será una descripción de lo que se llevará a cabo en Capítulo IV. (p. 11)

En base a lo citado anteriormente, en el presente trabajo de grado se utilizaron textos físicos y digitales como herramientas de documentación, así mismo se considera información encontrada en periódicos o informes relacionados a la problemática presentada.

## **Procedimiento**

Para abordar los objetivos específicos planteados en esta investigación se realizaron las siguientes actividades:

El primer objetivo específico consistió en describir las alternativas biológicas más favorables derivadas del proceso de la bioaumentación, para ello se evaluó las diferentes alternativas basadas en bacterias para la degradación del cianuro. Una vez identificadas las bacterias, se llevó a cabo la recopilación de información encontradas en las fuentes bibliográficas desglosando los aspectos más relevantes de cada una, destacando sus características, funcionamiento e importancia.

En el segundo objetivo específico se recopiló información sobre las condiciones de las lagunas de colas ubicadas en la Empresa Minerven, evaluando las características medio ambientales encontradas en el sitio y a partir de ello se realizó un cuadro comparativo con las especificaciones de las bacterias descritas con las condiciones de las lagunas de colas, lo cual fue esencial para la determinación del tercer objetivo.

Finalmente, en el tercer objetivo específico, se seleccionó la bacteria más eficaz para lograr la degradación del cianuro, gracias a la comparación realizada en el segundo objetivo, lo que nos permitió determinar la alternativa más favorable para dar solución a la problemática presentada en las lagunas de colas, basándose en las condiciones y características medio ambientales de la bacteria con su lugar de aplicación.

## Capítulo IV

### Presentación y análisis de resultados

En el siguiente capítulo se muestran los resultados obtenidos derivados de la investigación según el cumplimiento de los objetivos específicos con el fin de abarcar lo planteado en el objetivo general, el cual se expresa en el capítulo I.

**Describir las alternativas biológicas más favorables derivadas del proceso de la bioaugmentación como parte de la biorremediación de agua en las lagunas de colas.**

Como se mencionó anteriormente, la bioaugmentación hace referencia al uso de microorganismos capaces de degradar sustancias tóxicas, como el cianuro de sodio (NaCN), mediante procesos metabólicos que lo convierten en moléculas orgánicas o inorgánicas más simples, como el amonio, dióxido de carbono o metano.

Según Anderson y Cook (2004), Varios microorganismos han sido evaluados y aislados de aguas y suelos procedentes de minería, siendo los géneros más representativos Bacillus, Pseudomonas y Acinetobacter. Todos ellos presentando la capacidad de degradar el cianuro.

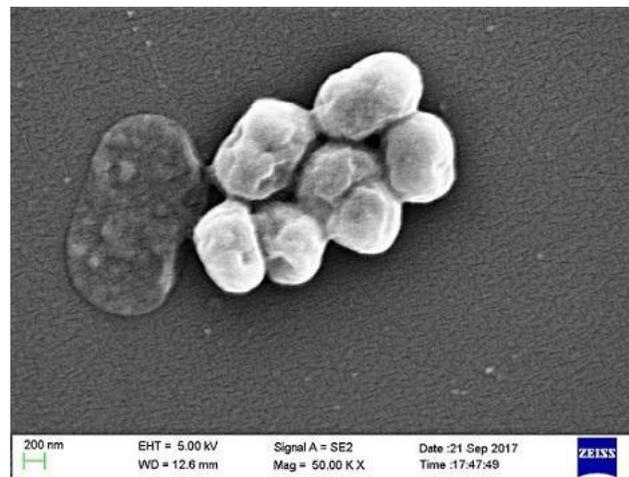
El género Bacillus se caracteriza por su crecimiento aerobio, el cual en algunas ocasiones puede llegar a ser anaeróbico, son grampositivas y tienen una morfología bacilar recta y un tamaño que varía entre los 0,5 y 10µm (micrómetros), su crecimiento óptimo ocurre en ambientes con pH neutro, es decir un valor de 7, y al ser una especie mesófila, a temperaturas comprendidas entre los 30°C y 45°C. Esta bacteria es capaz de degradar el cianuro de efluentes mineros gracias a la enzima cianuro di hidratasa, la cual puede convertir el cianuro el amonio o ácido fórmico con una eficiencia del 70%,

sin embargo, esta enzima posee un pH superior a 8.5 y por la inestabilidad térmica considerable, razón por la cual no es apta para su implementación en el proceso de biorremediación.



*Figura 13.* Típicos Bacillus teñidos y vistos en el microscopio óptico. Tomado de Ramón Contreras, 2014. Derechos reservados por Ramón Contreras

Las Acinetobacter son bacilos o cocobacilos aerobios estrictos e inmóviles y por lo general, se encuentran en parejas, estas no fermentan glucosa, todas sus derivadas poseen catalasa positivo y oxidasa negativo, el tamaño de las colonias que forman varía entre los 0.5 y 3 mm de diámetro con forma convexa y de bordes enteros, además, su temperatura óptima de crecimiento está comprendida entre los 33°C y 35°C, al ser inoculadas en agar MacConkey presentan colonias de color rosa, lo que las identifica como gramnegativas, este tipo de bacteria no es idónea para reducir de nitratos a nitritos, en cambio, puede utilizar una amplia variedad de compuestos como fuente de nutrientes, específicamente carbono, lo que le permite reducir el contenido de cianuro en un 69%.



*Figura 14.* Acinetobacter vista con un microscopio electrónico. Tomado por *Violeta Gómez, 2022, Venezuela.* Derechos reservados por Violeta Gómez

Ahora, entre los microorganismos con tal capacidad degradadora destaca el género *Pseudomonas*, gracias a su adaptabilidad a distintos medios y los diversos mecanismos de remediación que poseen. Son encontradas naturalmente en aguas tanto dulces como saladas, plantas, suelos limpios o contaminados, aguas cianuradas e incluso en materia orgánica en descomposición; tienen un diámetro de célula menor a  $1\ \mu\text{m}$  y su longitud total varía entre  $1,5$  y  $5\ \mu\text{m}$ , al momento de ser teñidas presentan un color rosado lo que las clasifica como Gramnegativas (igual que las bacterias típicas usadas en ingeniería sanitaria) y se caracterizan por ser bacterias aerobias; es decir, crecen y se reproducen en presencia de oxígeno; tener forma de bacilos rectos o poco curvados y flagelos polares que permiten su movilidad, reduce el cianuro un 96 a 99%.

De esta familia de bacterias se estudiaron tres miembros. A saber:

***Pseudomonas alcaligenes.*** Son capaces de sobrevivir en ambientes extremos, específicamente aquellos que poseen un pH alcalino con valores comprendidos entre 8.5 y 11. A este tipo de bacterias se les denomina “alcalófilas”; además tienen la capacidad de resistir el cianuro libre, cianato, complejos ciano-metálicos y/u otros ciano-derivados procedentes del proceso de lixiviación debido a la inducción de una oxidasa, y, a la vez, utilizan todos estos como fuente de nitrógeno o carbono para iniciar

su ruta biológica degradativa del cianuro. Algunos estudios (Luque-Almagro, 2005) indican que las condiciones idóneas de eliminación de cianuro de sodio (NaCN) para esta derivada de la familia Pseudomonas son un ph de 9,5, temperatura de 25-30°C, concentración de oxígeno disuelto del 10% del estándar correspondiente a la temperatura, es decir, 0,81 mg/L aproximadamente, y concentración de cianuro de 2mM (milimolar) o 9,8 mg/L.

Sin embargo, la Pseudomona Alcalígenes se debe manejar con cuidado a causa de su fácil propagación. De acuerdo con Luque-Almagro (2008), ante la presencia de cianuro, la bacteria...

...desarrolla una compleja respuesta que implica la inducción de enzimas de degradación de cianuro y cianato, como la nitrilasa NitC y la cianasa CynS, respectivamente, la inducción de una oxidasa terminal insensible a cianuro (CioAB), y de mecanismos de defensa frente al estrés oxidativo y de control del balance C/N intracelular en respuesta a la limitación de nitrógeno. A pesar de la inducción de la cianasa por cianuro, posteriormente se ha demostrado que la cianasa no participa en la ruta de asimilación de cianuro (p. 34).



*Figura 15.* Colonia de Pseudomonas Alcalígenes. Tomado de *Optimization of culture parameters of Pseudomonas alcaligenes for crack healing in concrete*, por B. Radha, J. Ray, A. Kar y C. Parimi, 2020, India. Derechos reservados por B. Radha, J. Ray, A. Kar y C. Parimi.

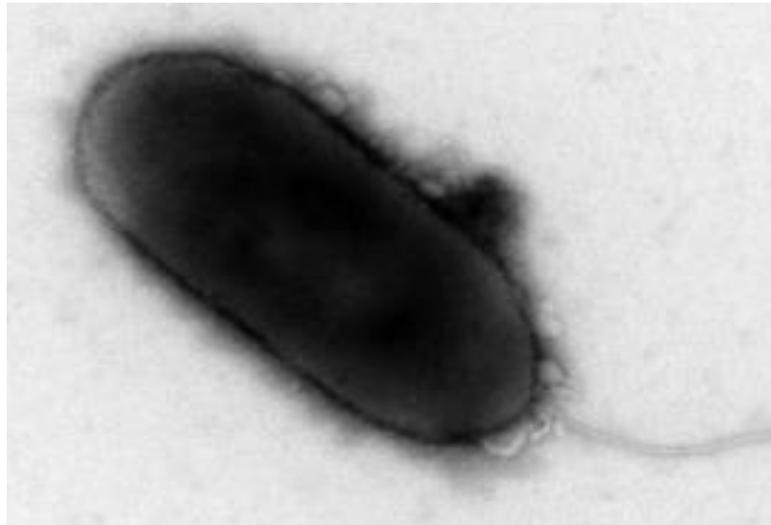


Figura 16. *Pseudomonas Alcalígenes* y su flagelo polar. Tomado de *Pseudomonas alcaligenes infection and mortality in cultured Chinese sturgeon, Acipenser sinensis*. J. Xu, X. Zeng, N. Jiang, Y. Zhou y L. Zeng, 2015, China. Derechos reservados por J. Xu, X. Zeng, N. Jiang, Y. Zhou, L. Zeng.

**Pseudomonas Pútida.** Resulta ser una de las bacterias de mayor interés para la degradación del cianuro, ya que además de que se encuentra en ambientes de lixiviación con cianuro, posee un metabolismo extremadamente versátil, debido a su extensa capacidad oxidativa y aprovechamiento de diferentes sustancias químicas o compuestos orgánicos como fuentes de carbono y nitrógeno, a pesar de la poca cantidad de nutrientes que puedan estar presentes en el agua. Algunas de estas fuentes son: hidrocarburos, ácidos alifáticos, aminas, amidas, aminoácidos y alcoholes. Por ser aerobias, utiliza el oxígeno como aceptor final de electrones; sin embargo, ocasionalmente utiliza el nitrato como aceptor alternativo, dando origen a un crecimiento anaerobio. Se caracteriza por su distinguida presencia en los sistemas de lodos activos de las estaciones depuradoras de aguas residuales.

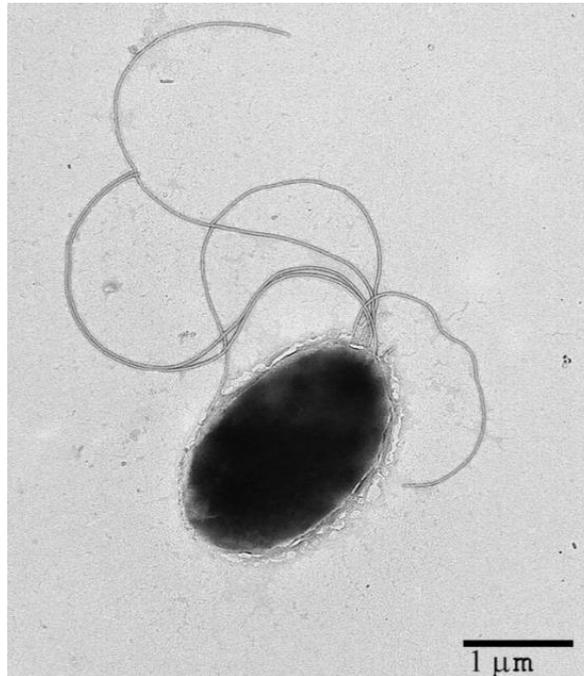
Además, puede desarrollar diferentes respuestas ante los ataques químicos de ambientes extremos como mecanismo defensivo para garantizar su supervivencia. Las condiciones ideales para su crecimiento y la eliminación del cianuro de sodio (NaCN) son un pH de 6,7-11, temperatura de 25-30°C, concentración de oxígeno disuelto de

acuerdo a la temperatura del 20-40%, lo que serían entre 1,62 mg/L y 3,24 mg/L, y una concentración de cianuro de 100-400 mg/L. Según indica González (2016).

...la ubicuidad de *P. Pútida* refleja su elevada capacidad para adaptarse a una enorme variedad de condiciones físico-químicas presentes en los distintos hábitats donde vive. Esta habilidad representa la capacidad que tiene la cepa de integrar las señales recibidas del medio extracelular con el estado fisiológico celular, conllevando la activación de una apropiada y compleja red de regulación que controla el metabolismo celular (p. 18).



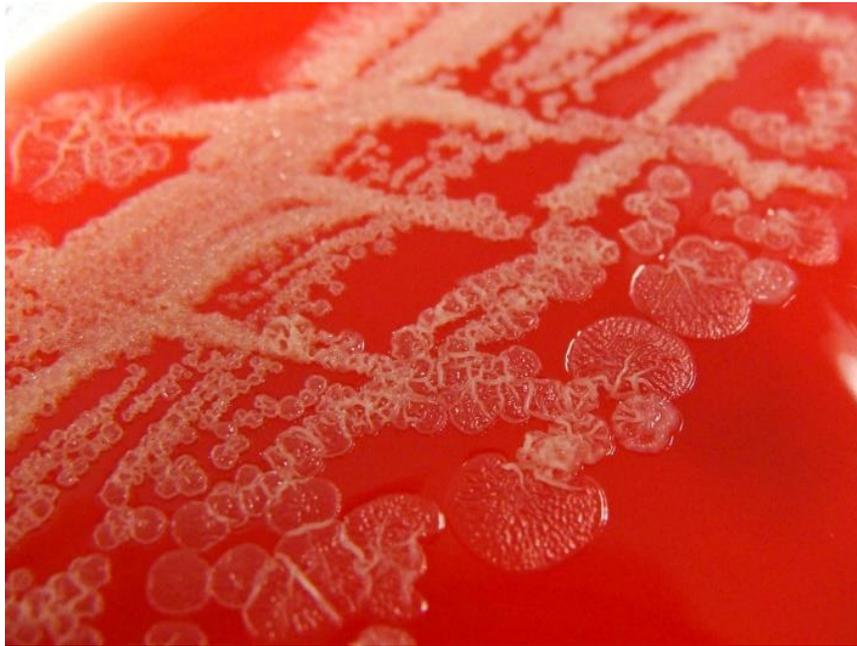
*Figura 17.* Tinción de *Pseudomonas Pútida*, 2014. Tomado de <http://retina.usal.es>



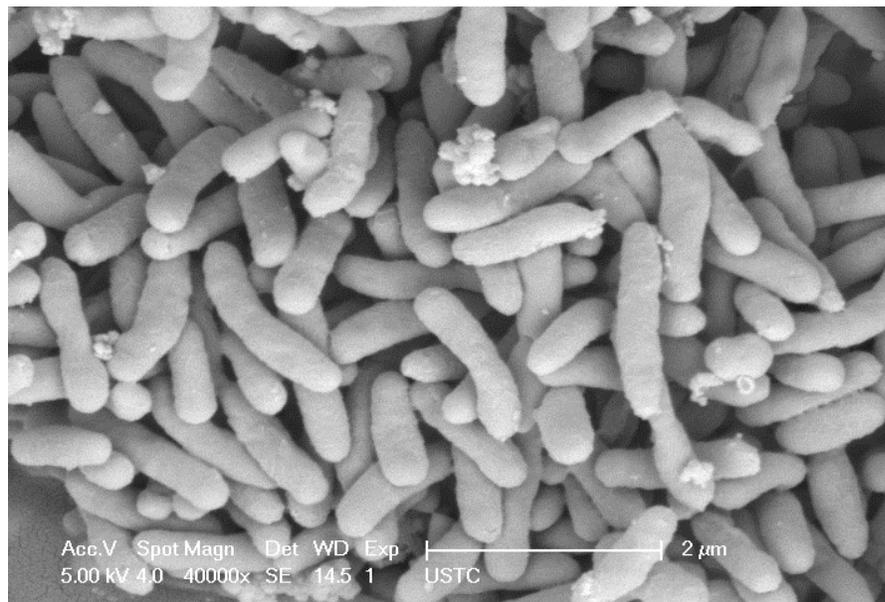
*Figura 18.* Pseudomonas Pútida. Tomado de Pseudomonas Pútida. Por Harman Patil, 2021. India. Derechos reservados por Harman Patil

**Pseudomonas Stutzeri.** Esta derivada no exige muchos nutrientes para su desarrollo, por lo tanto, puede ser cultivada en medios de tradicionales, como el agar Mac Conkey, sin embargo, no crece en agar Cetrimida, esto ocasiona que no sea evidente su crecimiento en lodos residuales. Un aspecto curioso de esta bacteria es que la enzima capaz de degradar el cianuro no es dependiente de este último, es decir, puede ser producida en ausencia de cianuro. Sus condiciones óptimas de crecimiento son un pH de 5-10, temperatura de 27-37°C, una concentración de oxígeno disuelto de 3%, es decir, 0,216 mg/L, y una concentración de cianuro de 1mM (milimolar) o 4,9mg/L. De acuerdo a Ebbs (2004).

...la monoxigenasa de cianuro convierte cianuro a cianato en presencia de cianasa, la cual es una enzima que al parecer brinda protección ante el envenenamiento con cianuro. Luego cataliza la conversión dependiente de bicarbonato de cianato en amonio y dióxido de carbono, una de las vías involucra una conversión oxígeno dependiente de  $CN^-$  a  $CO_2$  y  $NH_3$  (p.11)



*Figura 19.* Colonias de *Pseudomonas Stutzeri* crecidas en placa de agar con sangre de caballo. Tomado de *Pseudomonas Stutzeri* y sus colonias escarchadas, por Esteban Fernández, 2013, Ecuador. Derechos reservados por Esteban Fernández.



*Figura 20.* Cepas de *Pseudomonas stutzeri*. Tomado de *Isolation and Characterization of Pseudomonas stutzeri Capable of Reducing Fe (III) and Nitrate from Skarn-type Copper Mine Tailings* por Jin Wang, 2014, China. Derechos reservados por Jin Wang.

**Comparar la eficiencia de las bacterias empleadas para la bioaumentación como método biológico en la reducción del impacto ambiental producido por el proceso de laguna de colas.**

Al retomar las alternativas biológicas, que se plantean en relación con las técnicas empleadas en el proceso de extracción aurífera, se tiene las que favorecen al medio ambiente y el hábitat en las lagunas de colas. Estas alternativas surgen como respuesta ante el deterioro del ambiente y a la necesidad de conservarlo como parte del derecho humano a vivir en condiciones mínimas de riesgo de salud.

Por lo tanto, es preciso conocer sobre las técnicas que se conocen para desarrollar el proceso de lixiviación, de manera que se consideren las que ofrezcan un tratamiento biológico en las lagunas de colas que vayan en correspondencia con el ejercicio de una minería responsable.

¿El tratamiento de la contaminación por cianuro en las lagunas de colas se realiza mediante la aplicación de técnicas que buscan minimizar el impacto de los vertidos de este producto? Entre los métodos conocidos existen tecnologías amigables alternativas que promueven la preservación del ambiente, una de ellas es la bioaumentación.

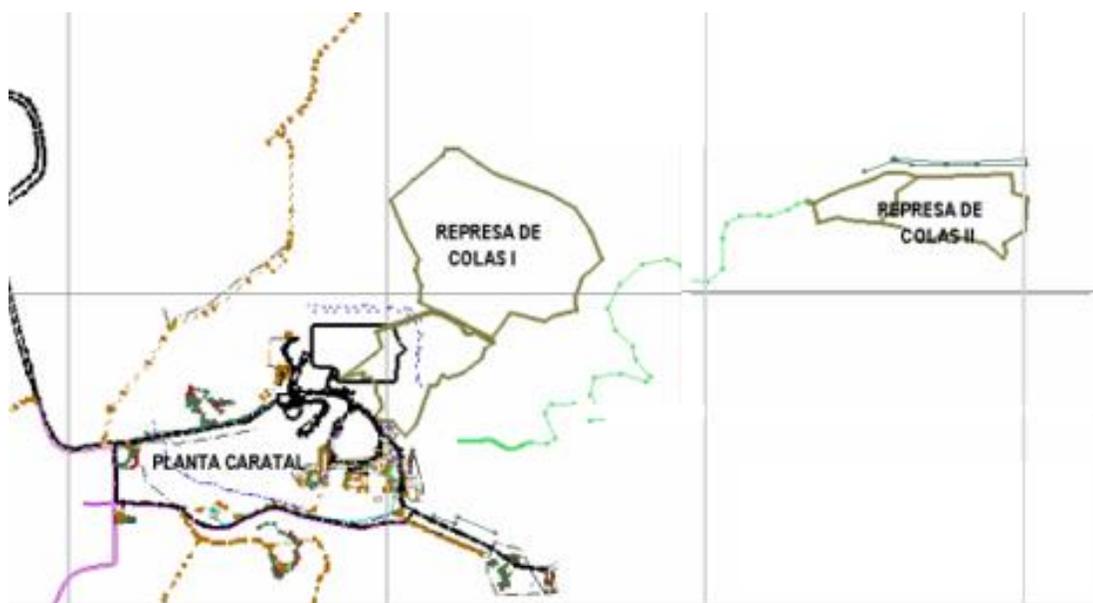
Anteriormente se mencionaron algunas de las bacterias que se emplean en la bioaumentación, la cual ha sido seleccionada como alternativa ecológica para la biorremediación de agua en lagunas de colas. Esta técnica busca reducir la contaminación por cianuro, usado como principal elemento en la obtención del oro en CVG Minerven, desde un enfoque amigable con el ambiente siguiendo lo establecido en el Decreto N°883.

CVG Minerven presenta unas características generales para sus dos lagunas de colas, de acuerdo a Solórzano (2011), la laguna de colas I:

...es un área adecuada con la finalidad de albergar los remanentes del proceso productivo conocido como colas, las cuales están constituidas por roca molida, cianuro, cal, hierro, pirita entre otros, tiene una superficie de 17 Has., su muro de contención de tierra es de 220 m., de largo y una altura de 15 m., en la parte central, la parte superior tiene un ancho de 3 m. y sus paredes tienen una inclinación de 1:3 (18, 43°). Está ubicada a 250 m. aprox. aguas abajo de la Planta Caratal. (p.15).

Para la laguna de colas II:

...este embalse está ubicado aproximadamente a 1,75 Km. Al este de la laguna de colas I, está constituido por una Represa de tierra de 20 mts. De altura, situada en una zona de estrechamiento topográfico, aguas arriba de la cual existe un valle adecuado para lograr un almacenamiento de 2.100.000 m<sup>3</sup> a la cota 190 m.s.n.m.; considerando una producción de 1.150 ton/día, equivalente a una producción de desechos de las plantas Caratal y Perú de 937,50 ton/día, ya que el peso unitario de los desechos es igual a 1,60ton/día (p.22).



*Figura 21.* Representación de la ubicación de las lagunas de colas I y II de CVG Minerven. Tomado de *Propuesta de un plan de emergencia para la laguna de colas II*

de la empresa CVG Minerven, por Luis Solórzano, 2011, Venezuela. Derechos reservados por Luis Solórzano

Las investigaciones de Solorzano (2011) y Herrera (2017), cuyo sitio de investigación fue CVG Minerven, indican que, por medio de la observación directa y muestras recolectadas periódicamente de las lagunas de colas, se logró determinar el valor de algunas características físico-químicas como pH, temperatura y concentración de cianuro, presentes en las lagunas, estas se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4.

*Valores de las condiciones físico-químicas halladas en las lagunas de colas de CVG Minerven,*

Condiciones presentes	pH	Temperatura (°C)	Concentración Oxígeno Disuelto (mg/L)	Concentración de Cianuro de Sodio (mg/L)
Lagunas de Colas de CVG Minerven	9,4	35,4	-	0,19

*Nota:* Por Mariela Almedo y Luis Rivas, 2022, Venezuela. Derechos reservados por Mariela Almedo y Luis Rivas.

Inicialmente para la concentración de oxígeno disuelto no se tiene un valor exacto ya que este se ve afectado por diversos factores que no permiten un 100% de saturación, estos son la temperatura, presión atmosférica, altura, salinidad y demanda bioquímica de oxígeno (DBO), es decir, que se tendrá un valor de oxígeno disuelto solo para las condiciones que presente la laguna al momento del muestreo, sin embargo, se puede realizar una estimación de tal cifra analizando el comportamiento normal de dichos factores frente a procesos de lixiviación con cianuro.

La concentración de oxígeno disuelto, también llamada saturación de oxígeno, disminuye mientras aumenta la temperatura y por lo general, las superficies de los

cuerpos de agua requieren una menor concentración de oxígeno disuelto para alcanzar el 100% de saturación a una temperatura dada, mientras que para el fondo es el caso contrario.

Para sitios con gran altura respecto al nivel del mar y bajas presiones atmosféricas, se encuentran bajos valores de concentración de oxígeno disuelto a causa de la dispersión de los gases, al igual que la salinidad, a medida que esta aumenta, la saturación de oxígeno en el agua disminuye, incluso si se trata de un cuerpo de agua dulce, puede existir la presencia de contenido mineral que altere la salinidad.

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) determina la cantidad de oxígeno disuelto que consumen los microorganismos para degradar compuestos orgánicos, aquellos ambientes donde el DBO sea alto, el oxígeno disuelto tendrá un valor bajo.

Recordando que en CVG Minerven, para la laguna de colas I y II existe una temperatura promedio de 35,4, superficies de 17 y 10,5 hectáreas y profundidades de 15 y 20 metros respectivamente, además, al encontrarse a una altura de 190 m.s.n.m la primera y 186,5 m.s.n.m la segunda, presentan una presión atmosférica normal. Por otra parte, el agua residual del proceso de lixiviación trae consigo minerales disueltos como zinc, cal, hierro y pirita, además del cianuro, lo cual aumenta el pH de las lagunas de colas convirtiéndolas en un medio moderadamente alcalino. Las condiciones anteriormente mencionadas de las lagunas de colas de CVG Minerven, se puede realizar una estimación de la concentración de oxígeno disuelto del 40% del valor estándar para la temperatura correspondiente. Lo que modificaría la tabla de características físico químicas de la siguiente manera:

Tabla 5.

*Valores de las condiciones físico-químicas incluyendo Oxígeno Disuelto (OD) halladas en las lagunas de colas de CVG Minerven*

Condiciones presentes	pH	Temperatura (°C)	Concentración Oxígeno Disuelto (mg/L)	Concentración de Cianuro de Sodio (mg/L)
Lagunas de Colas de CVG Minerven	9,4	35,4	2,8	0,19

*Nota:* Por Mariela Almedo y Luis Rivas, 2022, Venezuela. Derechos reservados por Mariela Almedo y Luis Rivas.

Estableciendo una tabla comparativa entre las características físico-químicas óptimas para el crecimiento de las bacterias, de acuerdo a los estudios anteriores, se tiene:

Tabla 6.

*Condiciones óptimas de crecimiento para las Ps. Alcalígenes, Ps. Pútida y Ps.*

*Stutzeri*

	pH	Temperatura (°C)	Concentración Oxígeno Disuelto (mg/L)	Concentración de Cianuro de Sodio (mg/L)
Pseudomonas Alcalígenes	9,5	25-30	0,81	9,8
Pseudomonas Pútida	6,7-11	25-30	1,62-3,24	100-400
Pseudomonas Stutzeri	5-10	27-37	0,216	4,9

*Nota:* Por Mariela Almedo y Luis Rivas, 2022, Venezuela. Derechos reservados por Mariela Almedo y Luis Rivas.

Además, gracias a Zapata (2020) quien estudio a los microorganismos capaces de degradar el cianuro presente en aguas residuales industriales, se puede observar la eficiencia de cada una al momento de degradar el cianuro.

Tabla 7.

*Eficiencia para degradar cianuro de sodio de las Ps. Alcalígenes, Ps. Pútida y Ps. Stutzeri.*

Microorganismo	Eficiencia (%)
Pseudomonas Alcalígenes	96
Pseudomonas Pútida	94
Pseudomonas Stutzeri	99

*Nota:* Por Mariela Almedo y Luis Rivas, 2022, Venezuela. Derechos reservados por Mariela Almedo y Luis Rivas.

### **Seleccionar la alternativa más eficaz para la biorremediación de agua para las lagunas de colas.**

Observando los resultados presentados en las tablas anteriores donde se evidencian las condiciones presentes en las lagunas de colas de CVG Minerven y aquellas condiciones óptimas para el crecimiento de las bacterias, se puede deducir que las que mejor se adaptan a tales características físico-químicas son las Pseudomonas Alcalígenes y las Pseudomonas Stutzeri debido a la concentración de cianuro requerida por cada, las cuales presentan una eficiencia para degradar dicho compuesto del 96% y 99% respectivamente, no obstante, la Ps. Alcalígenes utiliza una concentración de cianuro igual al doble que la Ps. Stutzeri, lo cual se aleja bastante de la realidad presente en las aguas residuales de CVG Minerven, por este motivo se eligió como microorganismo degradador las Pseudomonas Stutzeri el cual presenta mayor versatilidad y eficiencia.

La concentración de cianuro en las lagunas de colas de CVG Minerven corresponde a 0,19 mg/L, pero este valor es dado cuando el efluente ya ha sido sometido a un proceso de filtrado para reducir esta concentración. Por lo tanto, se propone como alternativa más eficaz para la biorremediación de agua de lagunas de colas la instalación de un sistema de biodiscos rotatorio ubicado en el pie de la laguna

de colas, como medio de crecimiento y reproducción para las bacterias con la finalidad de reducir degradar el cianuro para disminuir el impacto ambiental que genera su vertido.

Los sistemas de biodiscos rotatorios suponen una optimización de los filtros percoladores, siendo empleados para el tratamiento de aguas residuales como método biológico-aeróbico de lecho fijo, es decir, con una velocidad de flujo baja, que permite que las partículas se mantengan relativamente en descanso formando biomasa.

Su elaboración consiste en un recrear un reactor de mezcla completa haciendo uso de un tambor plástico de 200 litros de capacidad que cuente con, una entrada para emplear una bomba hidráulica de potencia de al menos 1,5 HP para proveerlo del agua residual a ser tratada, y una salida para devolver el agua ya provista de microorganismos a la laguna de colas; en su interior se distribuyen al menos 18 discos de acrílico con un diámetro de 0,4m separados cada 4cm y sumergidos en un 40% de la capacidad del tambor, cabe destacar que algunos de estos sistemas suelen incluir termostatos para regular la temperatura interior del tambor y propiciar la reproducción de las bacterias.



*Figura 22.* Sistema de biodiscos en fase de mantenimiento. Tomado de *Tratamiento de aguas residuales mediante biodiscos en la planta de beneficio Reina del Cisne, El Pache-Portovelo-El oro* (p.66), por Boanerges Correa y Joseph Mocha, 2021, Ecuador. Derechos reservados por Boanerges Correa y Joseph Mocha



*Figura 23.* Instalación y adecuación del sistema de biodiscos. Tomado de *Tratamiento de aguas residuales mediante biodiscos en la planta de beneficio Reina del Cisne, El Pache-Portovelo-El oro* (p.66), por Boanerges Correa y Joseph Mocha, 2021, Ecuador. Derechos reservados por Boanerges Correa y Joseph Mocha

Basándose en el funcionamiento de las plantas de tratamiento de lodos activos, el cual consiste en un cultivo aeróbico de microorganismos que oxidan y reducen la materia orgánica, y partiendo de que las *Pseudomonas* pueden ser fácilmente encontradas en este tipo de ambiente, se pretende adaptar el mismo método a los biodiscos aprovechando las *Pseudomonas Stutzeri*, esto implicaría tomar una muestra de agua de las lagunas de colas e inocular las bacterias en un laboratorio con la posibilidad de utilizar diversos medios de cultivo como el agar MacConkey, agar tripticasa soya, agar rojo sangre de caballo, agar e incluso peptonas, sabiendo que una población requerida de bacterias (o biomasa) está en el orden de 3500 mg/L, lo que significa un conteo de 3500 microorganismos por litro, finalmente depositar los microorganismos dentro del sistema de biodiscos para que continúen su ciclo de vida.



*Figura 24. Aplicación de inóculos al sistema de biodiscos. Tomado de Tratamiento de aguas residuales mediante biodiscos en la planta de beneficio Reina del Cisne, El Pache-Portovelo-El oro (p.69), por Boanerges Correa y Joseph Mocha, 2021, Ecuador. Derechos reservados por Boanerges Correa y Joseph Mocha*

Para recrear dicho cultivo de laboratorio enfocándose en la reproducción de las *Pseudomonas Stutzeri* se deben propiciar las condiciones que la apoyen y a la vez, inhiban el crecimiento de otro tipo de microorganismo, tales condiciones serían:

Tabla 8.

*Condiciones necesarias de un cultivo de laboratorio para la reproducción de Pseudomonas Stutzeri*

Microorganismo	Medio de Cultivo	Concentración de agar	Temperatura (°C)	Tiempo (horas)
<i>Pseudomonas Stutzeri</i>	Agar King A (beige)	15 gr de polvo por litro	33-37	24-48

*Nota:* Por Mariela Almedo y Luis Rivas, 2022, Venezuela. Derechos reservados por Mariela Almedo y Luis Rivas

Resultados positivos de este tipo de inoculación deben mostrar el color rojo o azul verdoso alrededor de las colonias.

Haciendo uso de una manivela cuyo movimiento pone en marcha al eje perpendicular que está unido a los discos, por consecuente, estos últimos realizan rotaciones lentas que generan el contacto con el agua por parte de las láminas alojadas a lo largo de su curvatura, haciendo que los microorganismos presentes se adhieran a las láminas, tomen los nutrientes del agua y, al estar sumergidos en un 40%, también aprovechen el oxígeno de la superficie para realizar sus procesos metabólicos y degradar la materia orgánica existente en el agua residual o convertirla en compuestos más simples, y a su vez, reponer la biomasa (cantidad de microorganismos) en las láminas, tal como ocurre en los sistemas de lodos activos.



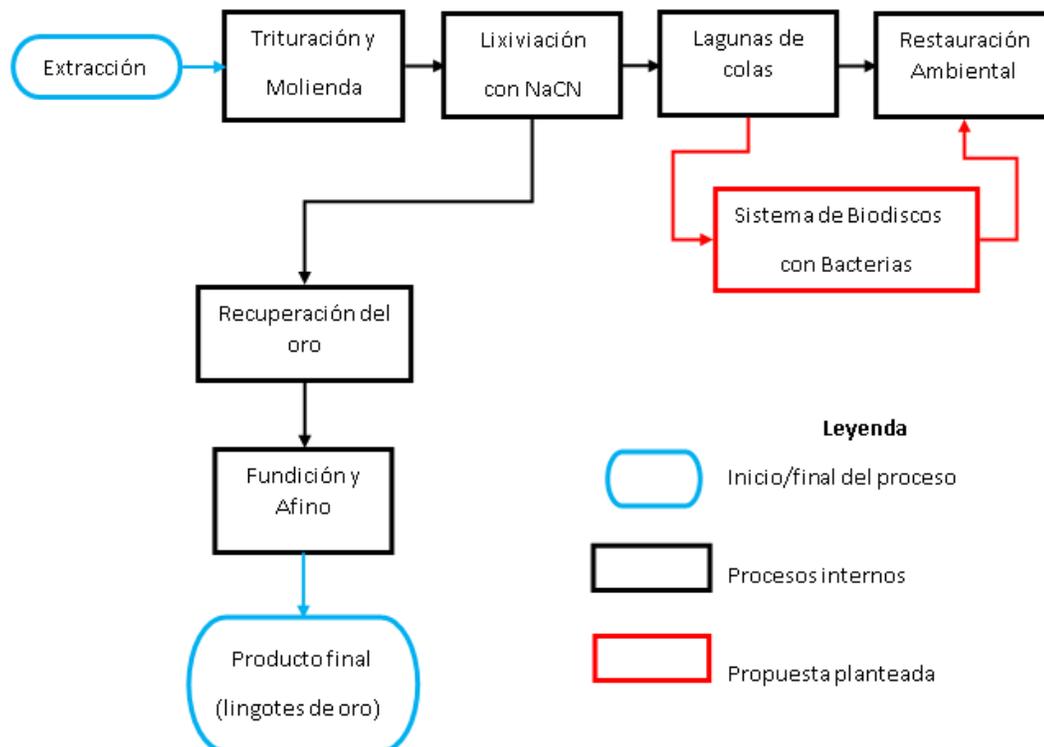
*Figura 25. Sistema de biodiscos en funcionamiento. Tomado de *Tratamiento de aguas residuales mediante biosdiscos en la planta de beneficio Reina del Cisne, El Pache-Portovelo-El oro* (p.67), por Boanerges Correa y Joseph Mocha, 2021, Ecuador. Derechos reservados por Boanerges Correa y Joseph Mocha*

Cabe destacar que a pesar de que para la *Pseudomonas Stutzeri* el tiempo de retención celular (TRC), es decir, el periodo de vida útil en el cual las bacterias cumplen sus funciones metabólicas, degradativas y reproductivas, es de 10 días, el espesor de la membrana de biomasa puede aumentar de tal manera que genere una condición anaeróbica por ausencia de oxígeno y nutrientes, ya que tales compuestos no logran atravesar toda la membrana, por lo tanto, las bacterias mueren y se produce el desprendimiento de estas de las láminas, este proceso natural no presenta un problema sino más bien un medio de autorregulación para el espesor. Negrete (2001) indica que...

...Al comienzo de la formación de la biopelícula se cuenta con cantidades suficientes de nutrientes y de oxígeno, con lo cual los microorganismos crecen aceleradamente aumentando considerablemente el espesor de la biopelícula. Sin embargo, a medida que se va engrosando la película, el oxígeno y los nutrientes son consumidos por la población microbiana que se encuentra sobre la superficie del disco, lo que da lugar a que el oxígeno no penetre todo el

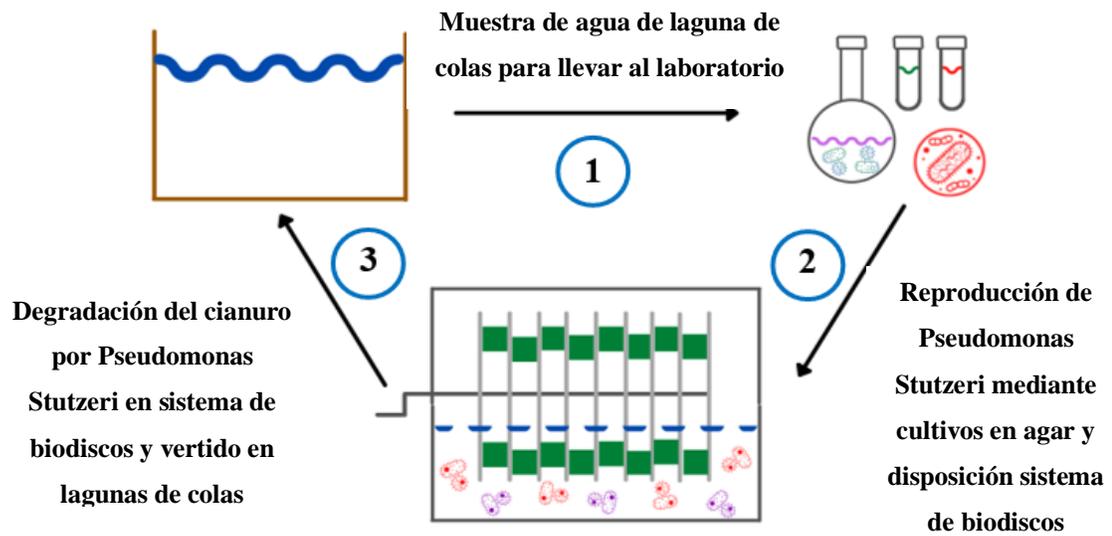
espesor de la biopelícula, estableciéndose un ambiente anaeróbico en el interior de la lama microbiana. (p.46).

Ahora, se puede observar un diagrama de flujo representativo del proceso de producción del oro y tratado de las lagunas de colas de acuerdo a la propuesta planteada:



*Figura 26.* Diagrama de flujo del proceso de producción del oro según propuesta de alternativa biológica, por Mariela Almedo y Luis Rivas, 2022, Venezuela. Derechos reservados por Mariela Almedo y Luis Rivas.

Finalmente, un esquema que muestra más de cerca el proceso que conlleva la implementación de los biodiscos en las lagunas de colas



*Figura 27.* Empleo del sistema de biodiscos a partir del agua de la laguna de colas, por Mariela Almedo y Luis Rivas, 2022, Venezuela. Derechos reservados por Mariela Almedo y Luis Rivas.

## Conclusiones y recomendaciones

### Conclusiones

**Describir las alternativas biológicas más favorables derivadas del proceso de la bioaumentación como parte de la biorremediación de aguas en las lagunas de colas.**

- Al llevar a cabo esta investigación se plantearon varias alternativas biológicas para realizar el proceso de la Bioaumentación, con la finalidad de aprovechar las propiedades de los microorganismos para degradar las sustancias tóxicas derivadas del cianuro de sodio (NaCN) como consecuencia de la actividad minera en el sur del estado Bolívar.
- Las especies estudiadas fueron las siguientes: Bacillus, Acinetobacter y Pseudomonas.
- Mediante la documentación realizada se obtuvo que la especie Bacillus, a pesar de tener una eficiencia del 70%, en el proceso de degradación del cianuro, posee un PH elevado y una inestabilidad térmica que la vuelven inadecuada para la Biorremediación planteada en este proyecto.
- La especie Acinetobacter tiene una capacidad para reducir el cianuro del 69% y posee una temperatura óptima por lo que se considera como una alternativa biológica factible.
- Sin embargo, para efectos de esta investigación se concluyó que la opción más adecuada viene representada por las Pseudomonas, ya que crecen en ambientes de lixiviación con cianuro, tienen una enorme capacidad de adaptación, pueden sobrevivir a condiciones extremas, y tienen una amplia condición degradativa

de sustancias tóxicas, las cuales son fáciles de producir en un laboratorio estas son derivadas de la utilización del cianuro en la extracción de oro, que varía del 94% al 99% lo que la vuelve ideal para efectos de este estudio.

**Comparar la eficiencia de las bacterias empleadas para la bioaumentación como método biológico en la reducción del impacto ambiental producido por el proceso de lagunas de colas.**

- Se analizaron tres tipos de Pseudomonas: Pseudomonas alcaligenes, Pseudomonas Pútida y Pseudomonas Stutzeri, todas con un alto índice de eficiencia que corresponde al 94%, 96% y 99% respectivamente.
- Luego de estudiar las distintas características físico-químicas presentes en las lagunas de colas de CVG Minerven, así como los factores que en ellas influyen, se puede concluir que las lagunas de la empresa poseen aguas con un ambiente alcalino de pH 9,4, temperatura de 35,4, concentración de oxígeno disuelto (OD) de 2,8 mg/L y una concentración de cianuro de 0,19 mg/L.
- Se concluyó que estas bacterias pertenecientes a este género son idóneas ya que no solo permiten degradar el cianuro eliminando las sustancias tóxicas casi por completo, sino que también favorecen al hábitat de las lagunas de colas y tienen una alta capacidad para mejorar las condiciones del medioambiente afectado por la contaminación.

**Seleccionar la alternativa más eficaz para la biorremediación de agua para las lagunas de colas.**

- Para efectos de esta investigación se llegó a la conclusión de que las Pseudomonas Stutzeri son las bacterias que representan la alternativa biológica

con mayor eficiencia para degradar el cianuro presente en las lagunas de colas con un porcentaje del 99% de éxito.

- Se descartó la *Pseudomona Alcaligenes* ya que esta bacteria utiliza una concentración de cianuro igual al doble que la que requiere la *Pseudomona Stutzeri*.
- A partir del estudio se llegó a la conclusión de que al existir una concentración de cianuro de 0,19mg/L en las lagunas de colas de CVG Minerven, es necesario proponer una alternativa eficiente para reducir por completo la presencia de este compuesto, por lo que se propone realizar la instalación de un sistema de biodiscos rotarios para reproducir la mayor cantidad de bacterias en las lagunas de colas y así contrarrestar el efecto de la contaminación por cianuro, producto de la explotación aurífera.

## **Recomendaciones**

- Con base en las conclusiones, realizar investigaciones acerca de otros microorganismos que posean la misma capacidad de degradar compuestos tóxicos, como sujetos alternativos a las *Pseudomonas*, siendo aplicados en distintos ambientes y sustancias.
- Para comprender mejor la biorremediación, profundizar el estudio de otros métodos biológicos como son fitorremediación, atenuación natural y bioestimulación, para la degradación de sustancias tóxicas.
- Analizar la aplicación de la lixiviación asistida con oxígeno mediante difusores como alternativa para aumentar la velocidad de disolución y reducir el reactivo (cianuro).

- Estudiar la posibilidad de implementar el sistema de biodiscos a mayor escala formando parte directa del proceso de obtención de mineral aurífero en CVG Minerven.
- Con el fin de mejorar o complementar el tópico tratado, estudiar el empleo de radiación ultravioleta para tratar los efluentes de lixiviación con cianuro.

## Referencias

Ángeles, M. (s.f). *Acinetobacter Baumani*. Universidad de Barcelona, España, Departamento de Microbiología y Parasitología. Recuperado de <https://www.seimc.org/contenidos/ccs/revisionestematicas/bacteriologia/acinetobacter.pdf>

Apaza, H. (2021). *Microorganismos empleados para la biorremediación de efluentes mineros con cianuro*. (Trabajo especial de grado). Universidad Nacional de Juliaca. Perú.

Arias, F. (2012). *El proyecto de investigación. Introducción a la metodología científica (Quinta Edición ed.)*. Caracas, Venezuela: Editorial Epistone.

Bermeo, M., Bonilla, S. y Coloma, T. (2017). *Neutralización: aplicado a aguas residuales (Primera Edición ed.)*. Guayaquil, Ecuador: Editorial Compás.

Bernal, C. (2006). *Metodología de la investigación*. Colombia: Editorial Pearson.

Cahuana, E. (2017). *Manejo ambiental de efluentes del proceso de cianuración de oro en la planta de beneficio de la corporación minera Ananea S.A.* (Trabajo especial de grado). Universidad Nacional del Altiplano- Puno. Perú

Calisaya, J. Castillo, D. (2020). *Aislamiento y capacidad degradadora de cianuro de Klebsiella sp. de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Magollo*,

Tacna, Perú. Recuperado de <https://revistas.unjbg.edu.pe/index.php/cs/article/view/985>

Camacho, L. Contreras, A. Aguilera, G. (2020). *Pseudomonas Stutzeri*. Instituto Politécnico Nacional. Ciudad de México, México, Departamento de Microbiología. Recuperado de [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0716-10182020000400443&lang=pt](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0716-10182020000400443&lang=pt)

Castillo, I. (2018). *Técnicas alternativas para la extracción de oro sin el uso de mercurio y su potencial aplicación a pequeña escala y minería artesanal en Colombia*. (Trabajo especial de grado). Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD. Colombia.

Cazar, A. (2015). *Recuperación de compuestos de cianuro de aguas residuales proveniente de la extracción del oro utilizadas como aguas de riego en la zona minera Zaruma – Portovelo*. (Trabajo especial de grado). Universidad Central del Ecuador. Ecuador.

Corbetta, P. (2003). *Metodología y técnicas de investigación social*. Madrid, España: Editorial McGraw Hill.

Correa, B. y Mocha, J. (2021). *Tratamiento de aguas residuales mediante biodiscos en la planta de beneficio del cisne, el pache-Portovelo-el oro*. (Trabajo especial de grado). Universidad Politécnica Salesiana. Ecuador

COVENIN, (1995). *Norma Venezolana para el Control de la Calidad de los Cuerpos de Agua*, Gaceta Oficial 5021, Decreto extraordinario Nro 833. Caracas, Venezuela

Di Paola, M. y Vicien, C. (2010). *Biorremediación: vinculaciones entre investigación, desarrollo y legislación*. (Trabajo especial de grado). Universidad de Buenos Aires. Argentina.

Escribano, M. (2016). *Análisis transcriptómico y proteómico de Pseudomonas pseudoalcaligenes CECT5344 en respuesta a cianuro*. Universidad de Córdoba, Argentina. (Trabajo especial de grado). Departamento de Bioquímica y Biología Molecular. Recuperado de <https://helvia.uco.es/xmlui/handle/10396/13825>

Espinosa, M. (2012). *Procesos microbiológicos para el control de la contaminación por explotación minera de oro*, Universidad de los Andes, Venezuela. (Revisión Bibliográfica). Recuperado de <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/24995/u627476.pdf?sequence=1>

Ferrer, G. (2011). *Estudio del comportamiento sísmico de relaves espesados mediante el análisis de columna unidimensional, considerando grietas de contracción*. (Trabajo especial de grado). Pontifica Universidad Católica de Chile. Chile.

Figueredo, M. (2015). *Estudio de la cinética de lixiviación de oro y plata por cianuración de una mena cuarzosa de origen epidermal*. Cuba. Recuperado de <http://www.redciencia.cu/geobiblio/paper/2015-Figueredo-plata%20y%20oro.pdf>

Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela, (2016). Decreto Nro. 2248, Caracas, Venezuela.

Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela, (2016). Decreto Nro. 2412, Caracas, Venezuela.

Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela, (2017). Decreto Nro. 3188, Caracas, Venezuela.

Garzón, J., Rodríguez, J. y Hernández, C. (2017). *Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible*. Colombia. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/reus/v19n2/0124-7107-reus-19-02-00309.pdf>

Giraldo, Asdrúbal. (2013). *El Oro: de la alquimia a la relatividad*. (Trabajo especial de grado). Universidad de Antioquia. Colombia.

Glazer, A y Nikaido, H. (1995). *Microbial Biotechnology: fundamentals of Applied Microbiology (Second Edition, ed.)*. Estados Unidos. Editorial: Cambridge University Press.

Gordillo, M. (2018). *Biodegradación de cianuro en guas y suelos contaminados por la minería de oro*. (Trabajo especial de grado). Fundación Universidad de América. Bogotá. Colombia.

González, R. (2016). *Salicylic acid biodegradation by Pseudomonas putida: Effect of particulate materials, microorganisms and other substrates*. (Tesis doctoral).

Universidad de Oviedo, España. Recuperado de [https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/38783/TD\\_RosanaGonzalezCombarros.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/38783/TD_RosanaGonzalezCombarros.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Hernández T. y Guardado R. (2010). *Funcionamiento y mecanismos de rotura en presas de relaves mineros: Estudio de caso la presa de colas de la empresa comandante Pedro Sotto Alba de Moa*. Perú. Recuperado de <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/CPG15-237.pdf>

Huertas, M. Luque, V. Martínez, M. García, I. Blasco, R. Moreno, C. Castillo, F. Roldán, M. (2009). *Biodegradación de cianuro por Pseudomonas pseudoalcaligenes CECT5344. Análisis proteómico*. Universidad de Córdoba, Argentina. Recuperado de [https://helvia.uco.es/xmlui/bitstream/handle/10396/14410/biotecnologia\\_2.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://helvia.uco.es/xmlui/bitstream/handle/10396/14410/biotecnologia_2.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Iguaran, A. y D' Angelo, A. (2019). *Estimación del dbo gráficamente en plantas de tratamiento de aguas servidas*. (Trabajo especial de grado). Universidad Católica Andrés Bello, Puerto Ordaz. Venezuela.

Iturbe. R. (2010). *¿Qué es la biorremediación? (Primera Edición, ed.)* México. Editorial: D.R

Julca, A. (2006). *La materia orgánica, importancia y experiencias de su uso en la agricultura*. Chile. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/237607597\\_LA\\_MATERIA\\_ORGANICA\\_IMPORTANCIA\\_Y\\_EXPERIENCIAS\\_DE\\_SU\\_USO\\_EN\\_LA\\_AGRICULTURA\\_O](https://www.researchgate.net/publication/237607597_LA_MATERIA_ORGANICA_IMPORTANCIA_Y_EXPERIENCIAS_DE_SU_USO_EN_LA_AGRICULTURA_O)

## ORGANIC\_MATTER\_IMPORTANCE\_EXPERIENCES\_AND\_IT\_ROLE\_IN\_AGRICULTURE

Lozada, J. (2016). *Opciones para una minería de oro que cumpla con las normas ambientales en la Guayana venezolana*. (Trabajo especial de grado). Universidad de los Andes. Mérida. Venezuela

Martínez, A. (2001). *Biodiscos: Alternativa de tratamiento biológico para aguas residuales cuando no se dispone de grandes extensiones de terreno*. Costa Rica. Recuperado de [https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec\\_marcha/article/view/1541/1433](https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/1541/1433)

Martínez, A. (2011). *Tratamiento de desechos del cianuro por biorremediación*. Centro de investigación en Protección Ambiental, Tecnológico de Costa Rica. (Trabajo de maestría). Recuperado de [https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec\\_marcha/article/view/317](https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/317)

Mendoza, J. Guevara, J. (2015). *Degradación de cianuro de sodio por pseudomonas sp. a dos temperaturas y tres pH*. (Trabajo especial de grado). Universidad Nacional de Trujillo, Perú, Departamento de microbiología. Recuperado de <https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/ECCBB/article/view/892/821>

Ministerio de Minas y Energía. (2015). *Glosario Técnico Minero*. Colombia. Recuperado de [http://centroprovincialnordeste.com.co/wp-content/uploads/transparencia/GLOSARIO\\_CPGMAE.pdf](http://centroprovincialnordeste.com.co/wp-content/uploads/transparencia/GLOSARIO_CPGMAE.pdf)

Moeller, G. Tomasini, A. (s.f). *Microbiología de lodos activados*. Recuperado de

<http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/018834/MEMORIAS2004/CapituloII/5Microbiologiadelodosactivados.pdf>

Negrete, A. Guzmán, R. Mejía, J. (2001). *Diseño de una planta piloto de discos biológicos rotatorios para aguas residuales institucionales en Barranquilla-Colombia*. (Trabajo especial de grado). Cooperación Universitaria de la Costa, Colombia. Recuperado de <https://repositorio.cuc.edu.co/handle/11323/1962>

Olaya, E. y Sevillano, B. (2019). *Análisis comparativo entre el método aguas abajo y suelo reforzado para el recrecimiento de la pesa de relaves Viluyo*. (Trabajo especial de grado). Universidad Ricardo Palma. Perú

Ortega, F. y Valdivia M. (2014). *Refinación de oro por disolución y precipitación selectiva a nivel de laboratorio en la empresa Desminc. S.A., mina La Libertad, Chontales*. (Trabajo especial de grado). Universidad Nacional de Ingeniería. Nicaragua.

Peña, E. (2007). *Calidad de agua, oxígeno disuelto (OD)*. (Trabajo especial de grado). Escuela superior Politécnica del Litoral, Ecuador. Recuperado de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6162/5/Investigacion.pdf>

Restrepo, J. Montoya, C. Muñoz, N. (2006). *Degradación microbiana de cianuro procedente de plantas de beneficio de oro mediante una cepa nativa de P. Fluorecens*. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Instituto de Minerales. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v73n149/a04v73n149.pdf>

Reuter, C. (2019). Re: *Biorremediación con Pseudomonas*. <http://www.labamerex.com/novedad027.htm>

Ríos, L. (2012). *Recuperación de oro de chatarra electrónica por extracción con solventes usando 2 Etil-Hexanol y Dibutilcarbitol*. (Trabajo especial de grado). Instituto Politécnico Nacional, CMPL. México.

Risquez y col (2002). *Capitulo III, Marco Metodológico*. Recuperado de <http://virtual.urbe.edu/tesispub/0095948/cap03.pdf>

Robles, J. (2020). *Uso de relave para mejoramiento de suelos por el método Compaction Grouting, Pasco – 2019*. (Trabajo especial de grado). Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. Perú

Sabino, C. (2000). *El proceso de investigación*. Venezuela: Panapo

Salazar, E. Nieves, B. (2005). *Acinetobacter sp.: Aspectos microbiológicos, clínicos y epidemiológicos*. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela. Departamento de Microbiología y Parasitología. Recuperado de [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1315-25562005000200003](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1315-25562005000200003)

Sela, G. (2021). *Lodos activados – Parámetros de control*. España. Recuperado de <https://cropaia.com/es/blog/lodos-activados-parametros-de-control/>

Severo, Vilca. (2013). *Proceso de lixiviación dinámica de minerales auríferos de baja ley en SMRL. San Juan Cien de Cabanilla-Puno*. (Trabajo especial de grado). Universidad Nacional Del Altiplano Puno. Perú.

Siuce, R. (2019). *Espesamiento, floculación de relave para la obtención de pasta de la compañía minera Caolín S.A.C.- Pasco 2018*. (Trabajo especial de grado). Universidad Nacional Federico Villarreal. Perú.

Solorzano, L. (2011). *Propuesta de un plan de emergencia para la laguna de colas II de la empresa CVG Minerven, El Callao, Estado Bolívar*. (Trabajo especial de grado). Universidad Central de Venezuela, Caracas. Venezuela.

Suarez, R. (2013). *Guía de métodos de biorremediación para la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos*. (Trabajo especial de grado). Universidad Libre Instituto de Postgrados Ingeniería. Colombia

Ulloa, Enrique. (2018). *Productos y servicios de Biorremediación: Potencial de comercialización internacional*. Costa Rica. Recuperado de [http://servicios.procomer.go.cr/aplicacion/civ/documentos/Productos%20y%20servicios%20de%20biorremediacion\\_Potencial%20de%20comercializacion%20internacional\\_octubre%202018.pdf](http://servicios.procomer.go.cr/aplicacion/civ/documentos/Productos%20y%20servicios%20de%20biorremediacion_Potencial%20de%20comercializacion%20internacional_octubre%202018.pdf)

Vargas, C. Carmona, M. Panay, A. (2020). *Biodegradación de cianuro por la enzima cianuro dihidratasa de Bacillus pumilus expresada heterológicamente en Escherichia coli*. Colombia. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/biote/v22n1/0123-3475-biote-22-01-27.pdf>

Veliz, A. (2005). *¿Cómo hacer y defender una tesis?* Venezuela. Recuperado de <https://es.slideshare.net/cyberneticomonday/como-hacer-y-defender-una-tesisarnoldo-claret-veliz>

Villegas, J. y Briceño, C. (2019). *Propuesta de un plan de gestión para los residuos mineros valorizables, dispuestos en lagunas de colas por la empresa C.V.G. Minerven C.A. Estado Bolívar*. (Trabajo especial de grado). Universidad Central de Venezuela, Caracas. Venezuela.

Wayens, C. (2004). *Estudio del Estudio del potencial de degradación de los hidrocarburos por Acinetobacter sp. y Pseudomonas pútida para su aplicación en la biorremediación de suelos contaminados*. (Trabajo especial de grado). Escuela de Biología del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Recuperado de [https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/206/potencial\\_degradacion\\_hidrocarburos.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/206/potencial_degradacion_hidrocarburos.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Yano, K. Ikebukuro, K. Watanabe, A. Karube, I. (1998). *Cyanide hydrolysis in cyanide degrading bacterium, Pseudomonas stutzeri AK61, by cyanidase*. Japón. Recuperado de <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9639937/>

Zapata, E. (2020). *Revisión documental de microorganismos capaces de degradar cianuro presente en aguas residuales industriales*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Colombia. Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/55922/75108346.2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

## **Anexos**

**Anexo A**  
**Planta de cianuración CVG Minerven**

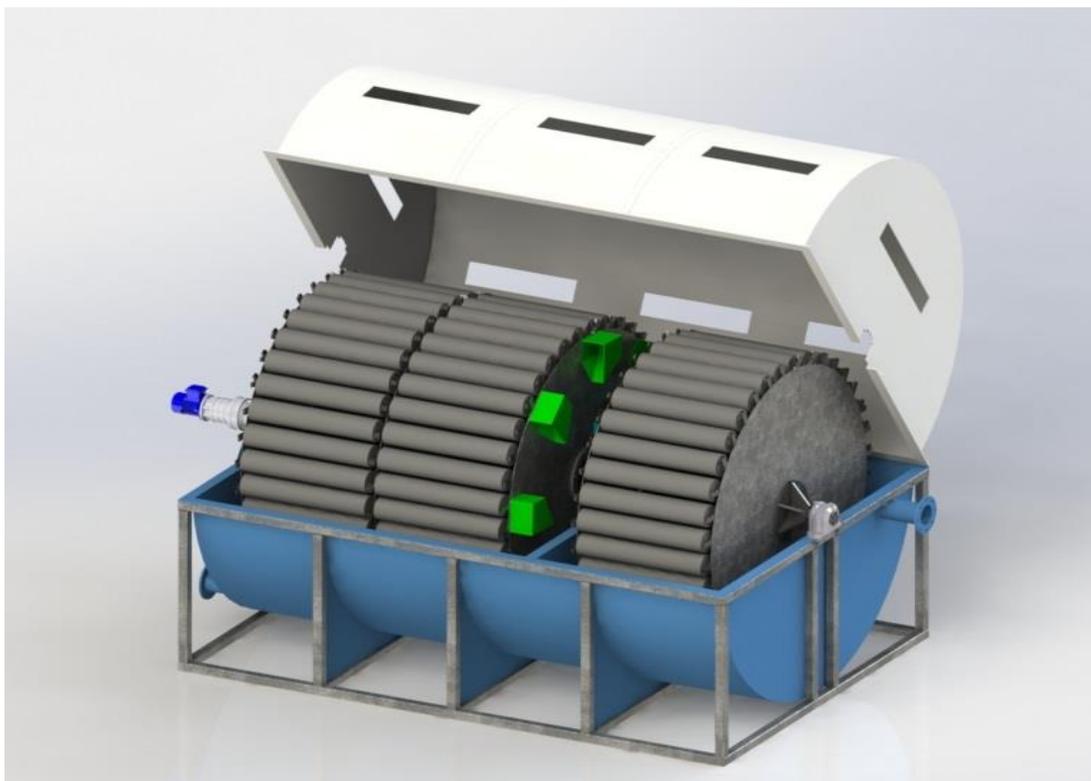


*Figura 28.* Lagunas de colas I y II, CVG Minervén, El Callao, Bolívar. Tomado por medio de la aplicación Google Earth, por Mariela Almedo y Luis Rivas, 2022, Venezuela. Derechos reservados por Mariela Almedo y Luis Rivas.



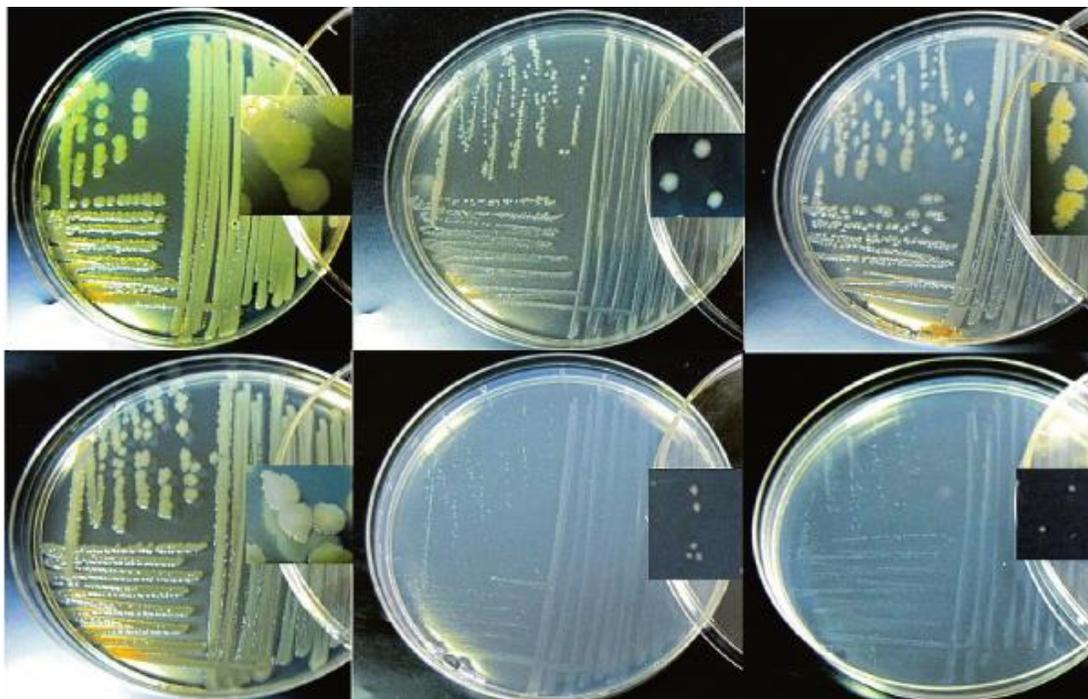
*Figura 29.* Planta CVG Minerven, El Callao, Bolívar. Tomado por medio de la aplicación Google Earth, por Mariela Almedo y Luis Rivas, 2022, Venezuela. Derechos reservados por Mariela Almedo y Luis Rivas.

**Anexo B**  
**Sistema de Biodiscos Rotativos**



*Figura 30.* Sistema de biodiscos. Tomado de <https://blog.fibrasynormasdecolombia.com/sistema-de-biodiscos/>

**Anexo C**  
**Cultivo de bacterias**



*Figura 31. Crecimiento de Pseudomonas Pútidas. Tomado de Detection, isolation, and preliminary characterization of bacteria contaminating plant tissue cultures, por Mokia Kaluzna, Artur Mikicinski, Piots Sobiczewski y Teresa Orlikowska, 2014, India. Derechos reservados por Mokia Kaluzna, Artur Mikicinski, Piots Sobiczewski y Teresa Orlikowska*



*Alcaligenes Sp.*

*Alcaligenes Sp*

*Figura 32.* Cultivo de *Pseudomonas Alcaligenes* formando colonias. Tomado de *Alcaligenes-The 4T Engine Oil Degradar*, por Hardik Pathak y Kamma Bhatnagar, 2011, India. Derechos reservados por Hardik Pathak y Kamma Bhatnagar



*Figura 33. Cultivo de Pseudomonas Stutzeri. Tomado de Type IV Pilus Genes pilA and pilC of Pseudomonas stutzeri Are Required for Natural Genetic Transformation, and pilA Can Be Replaced by Corresponding Genes from Nontransformable Species, por Stefan Graupner, Verena Frey, Rozita Hashemi y Wilfried Wackernagel, 2000, Reino Unido. Derechos reservados por Stefan Graupner, Verena Frey, Rozita Hashemi y Wilfried Wackernagel*