

**Bioprospección aplicada al tratamiento de aguas residuales: Estudio de casos y
metodologías exitosas**

Geraldine Bernal Villafañe

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD
Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiental
Bogotá, Colombia
2018

Bioprospección aplicada al tratamiento de aguas residuales: Estudio de casos y metodologías exitosas

Geraldine Bernal Villafañe

Monografía presentada como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniera Ambiental

Director:

Carlos Andrés Fajardo

Línea de investigación:

Gestión y manejo ambiental y biotecnología.

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiental

Bogotá, Colombia

2018

“Prometemos una vida de derroche y despilfarro, que en el fondo constituye una cuenta regresiva contra la naturaleza y contra la humanidad como futuro”. José “Pepe” Mujica.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por la oportunidad de formarme día a día como una persona integral con conciencia social y ambiental.

A mi compañero de vida Omar Buitrago, por estar siempre a mi lado, por su apoyo incondicional y sobre todo por su amor.

A mi hermanita por su disposición y deseo de crecer siempre juntas.

A mis padres por creer en mí.

A mi tía Patricia por estar de nuevo junto a nosotros.

A la Universidad Nacional Abierta y a Distancia y en especial al docente Carlos Andrés Fajardo por materializar esta meta en mi proyecto de vida.

Resumen

La bioprospección o prospección de la biodiversidad, se define como la búsqueda, elección e investigación metodológica de nuevas fuentes de compuestos químicos, genes, proteínas y otros productos a los cuales se les puede sacar un usufructo, y que se encuentran en diversos ambientes naturales alrededor del mundo. (O. Duarte Torres, 2011a)

Investigaciones realizadas permiten conocer el avance de la bioprospección entorno al tratamiento de las aguas residuales por medio de bacterias, hongos, algas y plantas, dichas investigaciones permiten observar escenarios potenciales para desarrollar biotratamientos en las aguas residuales de Colombia. (Cerón, Leal, & Nassar, 2009)

Colombia es reconocida como un país megadiverso, lo cual representa un potencial para el uso y aprovechamiento de sus recursos para implementar biotratamientos. El modelo tradicional de desarrollo de sectores productivos asociados a la biodiversidad ha generado la disminución de los recursos afectando la conservación de estos mismos para un futuro, ya que están planteados dentro de los paradigmas clásicos de la explotación de la naturaleza para materias primas.

Colombia, actualmente tiene la capacidad científica y tecnológica para avanzar de una forma más intensiva en estudios bioprospectivos aplicados al tratamiento de aguas residuales con base a sus hábitats naturales, los cuales son modelos potenciales para el estudio de la diversidad en bacterias, hongos, algas y plantas para ser aprovechados en temas de recuperación hídrica. (Melgarejo, Sánchez, Reyes, Newmark, & Santos-Acevedo, 2002).

La presente revisión sistemática se realiza con el fin de conocer el desarrollo actual de la bioprospección aplicada al tratamiento de aguas residuales en el contexto colombiano.

Palabras claves: *Bioprospección, aguas residuales, bacterias, hongos, algas y plantas.*

Abstract

The bioprospecting or prospecting from diversity is defined as the research, selection and methodologic investigation of new sources of chemical compounds, genes, proteins and other products that hold an actual or potential economic value, which are present in a wide diversity of natural environments around the world..(O. Duarte Torres, 2011b)

Previous research has allowed us to know the advance of bioprospecting on sewage treatment through bacteria, fungus, algae and plants, giving us tools to observe potential scenarios for the development of waste water biotreatment in Colombia.(Cerón et al., 2009)

Colombia is recognized as a megadiverse country, which represents an enormous potential to use and take advantage of its resources in order to implement biotreatments. The traditional development model of productive sectors associated with biodiversity has generated the reduction of resources for the future, since they are planned within the classic paradigms of nature's raw materials exploitation. Currently Colombia has the scientific and technological capacity to advance in a more intensive way in bioprospecting studies applied to the treatment of waste water based on its natural habitats, as a potential model for the study of diversity of bacteria, fungus, algae and plants to be used in water recovery themes.(Melgarejo et al., 2002)

The present systematic review is made with the final purpose of stating the current development of applied bioprospection on the waste water treatment in the Colombian context.

Keywords: *Bioprospecting, waste water, bacteria, fungus, algae and plants*

Contenido**P.**

Introducción	1
1. Descripción y Formulación Del Problema De Investigación	2
1.1 Problema.....	2
1.2 Pregunta De Investigación	3
2. Justificación	4
3.Objetivos De Investigación.....	6
3.1 Objetivo General	6
3.2 Objetivos Específicos	6
4. Marco Referencial.....	7
4.1 Antecedentes	7
4.2 Marco Teórico	9
4.2.1 Bioprospección aplicada al tratamiento de aguas residuales	12
4.2.2 Propiedades de las aguas residuales	14
4.2.3 Procesos biológicos	17
4.2.3.1 Carbono orgánico	23
4.2.3.2 Reducción de carbono y biotransformación de sulfato cálcico hidratado (Fosfogeso) por medio de bacterias sulfato reductoras	24
4.2.3.3 El nitrógeno	26
4.2.3.4 "ANAMMOX"	27
4.2.3.5 Biotransformación de productos farmacéuticos por bacterias oxidantes de amoníaco en procesos de tratamiento de aguas residuales.....	27
4.2.3.6 Lodos activados y microorganismos	29
4.2.3.7 Lechos bacterianos y microorganismos.....	30
4.2.3.8 Lagunas de oxidación y microorganismos.	31
4.2.3.9 Biodegradación de aguas residuales de porcicultura con el uso de microalgas.	32
4.2.3.10 Biorremediación del drenaje ácido de minas por medio de Algas.	33

4.2.3.11 Biorremediación de aguas rechazadas del proceso lodos por la macroalga (<i>Ulva lactuca</i> , Chlorophyta).....	34
4.2.3.12 Estanques anaerobios y microorganismos.....	36
4.2.3.13 Microorganismos y las lagunas de estabilización.....	37
4.2.3.14 Remoción de Cromo por hongos.....	39
4.2.3.15 Biotransformación de cromo hexavalente en nanopartículas de óxido de cromo (III) extracelulares utilizando <i>Schwanniomyces occidentalis</i>	40
4.2.3.16 Sistemas de tratamiento de aguas residuales con plantas.....	41
4.2.3.17 Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales.....	43
4.3 Marco Conceptual.....	51
4.3.1 Biotratamientos aplicados a las aguas residuales.....	53
4.3.2 Bacterias.....	54
4.3.3 Algas.....	54
4.3.4 Hongos.....	55
4.3.5 Plantas.....	55
4.4 Marco Legal.....	57
Análisis De Resultados.....	61
Conclusiones.....	67
Recomendaciones.....	69
Referencias.....	70

Índice De Tablas

Contenido	p.
Tabla 1 Tabla procesos aerobios y anaerobios según (Seoanez Calvo, 1995).....	23
Tabla 2. Procesos de fitorremediación.....	46
Tabla 3. Cuadro comparativo entre el agua de la planta de tratamiento de Escuela Militar José María Córdova y el agua tratada posteriormente a través del humedal artificial	49
Tabla 4 Características de los contaminantes de las aguas residuales	52
Tabla 5 Beneficios de las plantas en el tratamiento de las aguas residuales.....	56

Índice De Ilustraciones

Contenido	p.
Ilustración 1.Etapas de la bioprospección. Fuente:(Pnuma, 2009).....	11
Ilustración 2. Fotografías macroscópicas y microscópicas de las cepas bacterianas pertenecientes al cultivo mixto degradador de hidrocarburos del petróleo. Fuente: (M. Gómez et al., 2006).....	20
Ilustración 3.Fotografías macroscópicas y microscópicas de las cepas bacterianas pertenecientes al cultivo mixto degradador de plaguicidas organoclorados. Fuente: (M. Gómez et al., 2006)...	21
Ilustración 4.Filtros biológicos. Fuente: (Orozco, 2005).....	37
Ilustración 5.Humedal construido de flujo subsuperficial horizontal en la empresa farmacéutica. Fuente:(Salazar et al., 2013)	44
Ilustración 6.Matandrea. Fuente:(Arias Martínez et al., 2010).....	48
Ilustración 7. Pasto para. Fuente:(Arias Martínez et al., 2010)	48
Ilustración 8. Pasto taner. Fuente:(Arias Martínez et al., 2010)	48

Índice De Gráficas

Contenido	P.
Gráfico 1. Investigaciones de Bioprospección desarrolladas en Colombia. Modificado de: (O. Duarte Torres, 2009).....	10
Gráfico 2. Esquema manifestación de componentes biológicos. Modificado de: (Seoanez Calvo, 1995).....	15
Gráfico 3. Esquema Composición de las aguas residuales. Modificado de: (Seoanez Calvo, 1995).	16
Gráfico 4. Diagrama general de tratamiento de aguas residuales. Modificado de: (Orozco, 2005).	18
Gráfico 5. Procedimiento de depuración de carbono orgánico. Modificado de: (Arnáiz et al., 2000).....	24
Gráfico 7. Metabolización de amoníaco a través de bacterias. Fuente: (Xu et al., 2016)	28
Gráfico 8. Proceso Anaerobio de aguas residuales. Modificado de: (Seoanez Calvo, 1995).....	38

Introducción

La bioprospección es la exploración metodológica de nuevas fuentes de compuestos químicos, genes o productos con principios biológicos que puedan llegar a tener un valor productivo o académico. El desarrollo bioprospectivo ha evolucionado con el paso del tiempo en las últimas décadas ha logrado un impulso importante para la industria farmacéutica, así como para agricultura.(O. Duarte Torres, 2011b).

En Colombia tras la reunión andina se acordó la definición del concepto de bioprospección como: “Temática y trabajo colectivo orientados a la búsqueda, conocimiento y selección de organismos o productos derivados, con uso actual o potencial en salud, alimentación, industria y medio ambiente, entre otros y su utilización de manera sostenible en procesos productivos a pequeña y grande escala, con aplicación mundial de los productos o servicios generados”.(Melgarejo et al., 2002)

Son muchas las aplicaciones que se han venido gestando en torno a este tema y la evolución de las mismas en las diferentes industrias, ha permitido establecer el uso del recurso natural sin afectar su existencia a futuro, (Melgarejo et al., 2002) , lo anterior apoyado en el *Convenio de Diversidad Biológica (CDB)* que busca el desarrollo de la bioprospección evitando en lo posible ocasionar impacto en el medio ambiente.(Consejo Nacional de Política Económica y Social, República de Colombia, & Departamento Nacional de Planeación, 2011)

En la última década han surgido necesidades sociales relacionadas con la protección y conservación del medio ambiente, que van desde la mitigación del cambio climático global,

hasta el procesamiento de residuos generados diariamente. Este hecho puede representar un incentivo para desarrollar el campo de la bioprospección, involucrando organismos y procesos de tecnologías limpias, por ejemplo, el uso de la bioprospección para el desarrollo de biocombustibles. (FAO, 2008)

Hoy en día los estudios en los que se tiene como objeto de estudio los sistemas biológicos para el tratamiento de aguas residuales tienen un amplio interés para la comunidad científica, ya que estos tratamientos pueden representar procesos con una mayor eficacia en la depuración de diversos contaminantes, adicionalmente, los costos de obtención y desarrollo pueden ser menores. (Gómez-Bertel et al., 2008)

1. Descripción y Formulación Del Problema De Investigación

1.1 Problema

La bioprospección o prospección de la biodiversidad, se define como la búsqueda, elección e investigación metodológica de nuevas fuentes de compuestos químicos, genes, proteínas y otros productos a los cuales se les puede sacar un usufructo, y que se encuentran en diversos ambientes naturales alrededor del mundo. (Duarte, 2011).

Colombia es un país considerado como megadiverso, lo cual representa una viabilidad para el uso y aprovechamiento de dicha biodiversidad. A pesar de las cifras de la biodiversidad colombiana, la proyección como potencial económico hacia el futuro no resulta muy prometedor, debido a que las actuales líneas de producción están basadas en modelos tradicionales, los cuales para el día de hoy son obsoletos ya que no tienen en cuenta factores

ambientales como la degradación de la fuente natural donde extraen el recurso.(Cerón et al., 2009)

En relación a los escasos estudios realizados sobre los avances científico-tecnológicos de Colombia, para proyectarse en temas bioprospectivos, se puede inferir que actualmente el país cuenta con plataformas científicas y tecnológicas para lograr adelantos importantes e intensivos en actividades bioprospectivas dirigidas al tratamiento de aguas residuales.(Duarte Torres, 2011)

Según los estudios sobre biodiversidad en Colombia (Arbeláez & Cortés, 2013), se demuestra el poco conocimiento que se tiene sobre los microorganismos y su diversidad. Sin embargo, Colombia cuenta con hábitats naturales los cuales son modelos potenciales para el estudio de la diversidad microbiana y la ecología de los microorganismos para generar técnicas o mecanismos para ser aprovechados en temas de contaminación.(Díaz-Cárdenas & Baena, 2015)

Debido a la falta de información disponible al respecto, se valida la necesidad de desarrollar investigaciones de este tipo que contribuyan al conocimiento y al desarrollo

En este trabajo se pretende hacer una investigación bibliográfica que permita delimitar el estado de la aplicación de la bioprospección al tratamiento de aguas residuales.

1.2 Pregunta De Investigación

¿De qué forma se aplica la bioprospección en el tratamiento de aguas residuales?

2. Justificación

La bioprospección es definida como la exploración metodológica de la biodiversidad para fines lucrativos o académicos y se ha convertido recientemente en una atractiva estrategia mediante la cual los países ricos en biodiversidad pueden maximizar sus capacidades endógenas para realizar actividades de Ciencia y Tecnología (O. & V. Duarte Torres, 2009). Por lo tanto, la bioprospección representa una autentica herramienta de poder que permite el uso sostenible de la biodiversidad, específicamente de los recursos biológicos, genéticos y derivados, sus componentes y propiedades. A través de ellas, se puede acelerar el proceso de búsqueda y conocimiento de moléculas, genes, o ingredientes activos, que luego pueden ser producidos industrialmente sin tener que recurrir al uso extractivo insostenible de la biodiversidad.(Consejo Nacional de Política Económica y Social et al., 2011)

Cuando la diversidad cobra importancia y más en un país como Colombia, se abre la puerta para grupos investigativos en ingeniería ambiental, los cuales generan estrategias a partir de dicha biodiversidad para la creación de productos derivados del cultivo de microorganismos para la mitigación, control y prevención de la contaminación, lo anterior resulta ser muy atractivo para las condiciones medioambientales actuales. (Peixoto, 2011).

Los microorganismos están ampliamente distribuidos en el mundo, y habitan diferentes tipos de ecosistemas, por lo tanto, cumple una función clave dentro de los ciclos biogeoquímicos y en el mantenimiento y la supervivencia de las plantas, los animales y relaciones simbióticas. La capacidad de habitar diferentes ecosistemas permite a los microorganismos tener una alta versatilidad metabólica. Debido esta naturaleza, el potencial biotecnológico de los microorganismos es invaluable, generando muchas aplicaciones posibles para el desarrollo

de la bioprospección. (Peixoto, 2011). En Colombia se están desarrollando investigaciones sobre el potencial que tienen los microorganismos para ser empleados en bioprospección aplicada a la ingeniería ambiental, este potencial específico puede llegar a ser útil para el control biológico, la biorremediación, y demás técnicas con aplicaciones en la industria. (Melgarejo & Reyes, 2002).

Esta monografía se escribe con la intención de establecer el estado actual de la aplicación de la bioprospección específicamente en el tratamiento de aguas residuales. Se pretende destacar los avances nacionales como internacionales en esta área, otorgando especial énfasis a los estudios más relevantes en nuestro país.

3.Objetivos De Investigación

3.1 Objetivo General

Analizar el desarrollo de la bioprospección aplicada a la Ingeniería Ambiental en torno al tratamiento de aguas residuales.

3.2 Objetivos Específicos

1. Generar un compendio del panorama de la bioprospección aplicada al tratamiento de aguas residuales.
2. Formular posibles estrategias para la aplicación de la bioprospección en tratamiento de aguas residuales.
3. Realizar una revisión sistemática de la bibliografía relacionada a las metodologías que involucran bioprospección en el tratamiento de aguas residuales.

4. Marco Referencial

4.1 Antecedentes

La bioprospección ha sido desarrollada desde la antigüedad en continentes como Europa y Africa, inicialmente se considera que gran parte de su concepto y aplicación yace en los pueblos indígenas cuya explotación tenía fines medicinales o espirituales.(O. Duarte Torres, 2011b)

Con el acentamiento del hombre y la revolución industrial, las grandes industrias sobretodo la farmaceutica comenzaron a desarrollar practicas bioprospectivas con el objetivo de descubrir y generar bioproductos obtenidos de fuentes biologicas los cuales se aprovecharon para descubrir gran parte de la constitución de los seres vivos, al igual que la potencialidad de las sustancias bioactivas para resolver situaciones de salud de la población.(O. Duarte Torres, 2011b)

Con el reconocimiento de la importancia de la biodiversidad en cada país , han surgido grupos de estudio que concentran interes en aprovechar la riqueza natural para explorar organismos en ambientes extremos o variables, la finalidad de estos estudios es obtener el mayor provecho del biorecurso sin colocar su existencia en peligro.(O. Duarte Torres, 2011b)

Actualmente Las actividades de bioprospección se encuentran relacionadas con industrias de cosméticos, biotecnología agrícola, agro insumos, semillas y medicina botánica entre otros.

Adicional una cuarta parte de los productos farmacéuticos son derivados de plantas.(Romeo Casabona, 2017)

La bioprospección ya no es considerada únicamente como la manipulación de un recurso biológico si no que a pasado a ser considerada como una estrategia que abre las puertas al biocomercio.(O. Duarte Torres, 2011a)

El problema de las aguas residuales es su incremento en la descarga permanente teniendo en cuenta sus niveles de toxicidad y su persistencia en el medio ya que en su recorrido afectan directamente los ecosistemas vulnerables, como por ejemplo los estuarios, zonas costeras y humedales. En Colombia la región Caribe ha sido muy afectada por compuestos orgánicos como los hidrocarburos y plaguicidas organoclorados que han afectado cascos urbanos como Santa Marta, Barranquilla, Cartagena, los Golfos de Morrosquillo y Urabá.(M. Gómez, Vivas, Ruiz, Reyes, & Hurtado, 2006)

En la región pacífica se reportan impactos considerables a los puertos de Tumaco y Buenaventura, y también hay gran afectación en las características de los ríos del departamento de nariño.

Actualmente, para contrarrestar los impactos generados por las aguas residuales se están colocando en acción técnicas de biorremediación, en las que a partir de procesos biológicos ciertas sustancias o compuestos son transformados en otros. La bioprospección en aguas residuales confronta y complementa a las tecnologías tradicionales para garantizar el equilibrio ambiental transformando completamente el contaminante. (M. Gómez et al., 2006)

4.2 Marco Teórico

El mundo esta sujeto a cambios y ultimamente, se han presentado de forma rapida y en algunos casos con consecuencias importantes como lo ha sido la disminucion de la biodiversidad. Por ello muchos paises estan adoptando objetivos frente a este hecho y frente al diseño de estrategias sin deteriorar el recurso.

Colombia, este ocupa el primer lugar en aves y orquideas, con alrededor de 54.871 especies, el segundo lugar en plantas, anfibios, peces dulceacuicolas y mariposas, el tercer lugar en reptiles y palmas y el cuarto lugar en diversidad de mamíferos, lo anterior nos da una representación de la importancia de la conservación frente a panoramas de exploración he inversión.(Instituto de Investigación de Recursos Biológicos & Humboldt, 2015)

En Colombia la bioprospección ha sido desarrollada por grupos de investigación, (Universidades, fundaciones privadas y gubernamentales) los cuales según Duarte en 2009, han adelantado investigaciones en diferentes tematicas como lo muestra la grafica acontinuación:

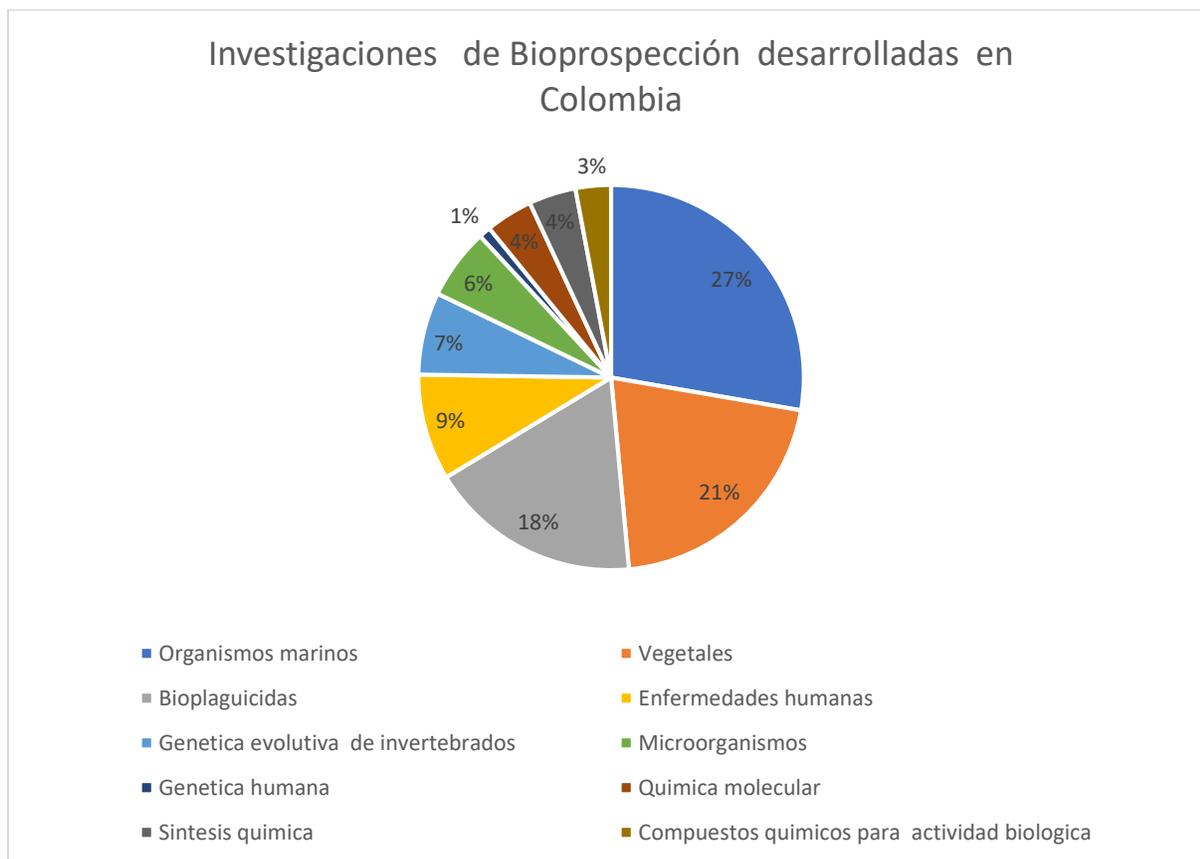


Gráfico 1. Investigaciones de Bioprospección desarrolladas en Colombia. Modificado de: (O. Duarte Torres, 2009)

Las investigaciones desarrolladas en Colombia no giran entorno a la bioprospección como tema central, si no que esta se ha desarrollado paralelamente junto con objetivos referentes a otras disciplinas, para los grupos investigativos es complejo avanzar en temáticas de bioprospección porque desafortunadamente el marco normativo y juridico de Colombia no facilita este desarrollo ya que se ajusta a procesos burcráticos con tiempos de respuesta lentos lo que no favorece las alianzas entre institutos y universidades o en dado caso entre naciones .(O. Duarte Torres, 2011b)

Para el desarrollo de la bioprospección se establecen etapas donde se incorpora la investigación con la biotecnología iniciando con la toma del recurso natural, su análisis, el producto y comercialización (Figura 1) (UNEP, 2005):

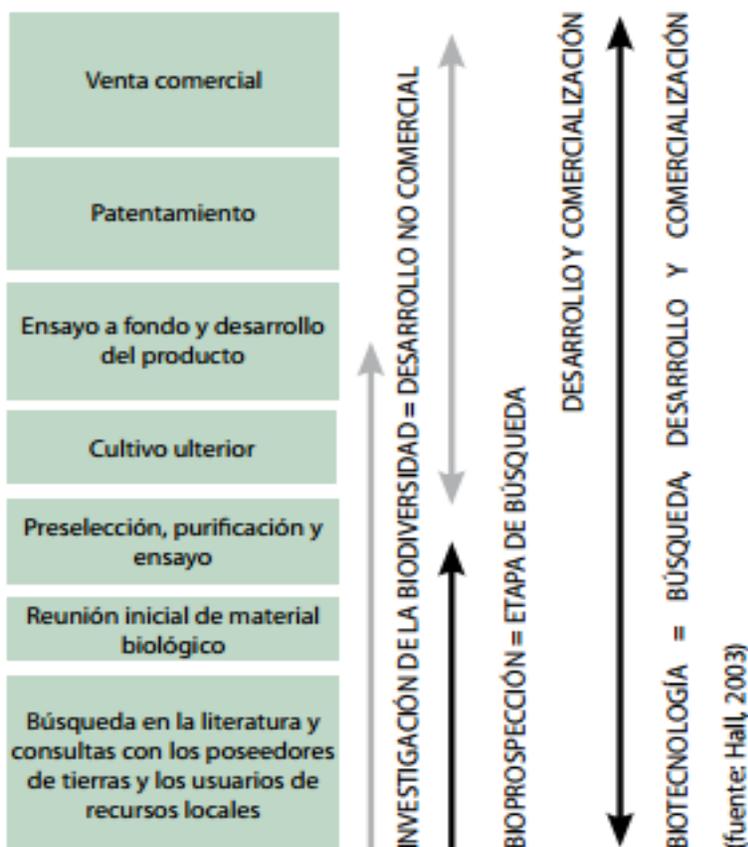


Ilustración 1. Etapas de la bioprospección. Fuente: (Pnuma, 2009)

En la etapa inicial de la bioprospección se compila información mediante la investigación de pueblos nativos, instituciones académicas, comunidades científicas, entidades públicas y privadas. Gran parte de la información frente a un recurso es conocida por aquellos pueblos o habitantes que se han desarrollado entorno a él, por lo cual es importante recopilar el conocimiento ancestral como posible punto de partida, sin olvidar que parte de los beneficios deben verse reflejados en su conservación cultural y medioambiental. (CORPOICA, 2012)

Cuando el recurso es extraído para su caracterización, los grupos investigativos empiezan un proceso de investigación exhaustivo, en el cual se evalúan las posibles aplicaciones confrontan conocimientos para generar o crear nuevos conceptos a través de numerosos ensayos en laboratorios, es por ello que precisamente cada país y en especial Colombia debe invertir en ciencia y tecnología para poder desarrollar un plan de investigación, sin tener que enfrentarse a obstáculos generados por falta de inversión.(CORPOICA, 2012)

Cuando se obtiene el producto, es sometido a un análisis para verificar si es susceptible de patente, para comenzar con su proceso de comercialización. Es el punto donde se mezclan todo tipo de intereses y poderes entre empresas y naciones. Por lo anterior es importante para el caso colombiano y sin lugar a duda para los países con riqueza en biodiversidad, establecer una normatividad clara, donde el reconocimiento y los beneficios se vean reflejados en su mismo territorio.(CORPOICA, 2012)

4.2.1 Bioprospección aplicada al tratamiento de aguas residuales

Es importante recordar las recomendaciones de la conferencia Internacional sobre Renovación y reciclado de las Aguas Residuales a través de Sistemas Acuáticos y Terrestres la cual se llevó a cabo en Bellagio en 1975, donde se realizó énfasis en el papel que debe cumplir los sistemas biológicos en la depuración de Aguas Residuales, es decir deben aplicar tecnologías adaptables al suelo, clima, vegetación, deben calcular con precaución problemas sanitarios y ecológicos y el objetivo principal es la máxima depuración de contaminantes, al menor costo y con aplicación social.(Seoanez Calvo, 1995).

Según lo dialogado en la Cumbre Ecologica Mundial llevada a cabo en Rio de Janeiro, Brazil a mediados de 1992, se reconocio la importancia de salvaguardar los recursos naturales. En esta cumbre se trataron temas relevantes como la conservación y desarrollo de la biodiversidad y estrategias para controlar focos contaminantes.(Orozco, 2005)

En general los focos contaminantes se desarrollan en el agua, tierra y aire, siendo el agua el recurso el de mayor trascendencia por su cualidad de ser locativa, solvente y vital. El agua es contaminada cuando se le agrega a sus características un elemento o compuesto ya sea organico o inorganico, el cual supera el maximo de tolerancia permitido para un uso determinado, la fuente de esta contaminación puede ser doméstica, indutrial, agricola o natural.(Orozco, 2005).

El agua tiene cualidades como es la autodepuración o de dilución de los contaminantes, pero factores socio-ambientales como los son el acelerado crecimiento demografico y la actividad industrial y agricola bloquea dicha propiedad ocasionando un aumento excesivo de la carga del contaminante imposibilitando su transformación.(Orozco, 2005)

Con relación a lo expuesto anteriormente, cobra importancia el tratamiento para las aguas residuales o servidas, las cuales son aquellas derivadas de la actividad domestica e industrial.(Orozco, 2005).

4.2.2 Propiedades de las aguas residuales

El agua residual cuenta con propiedades físicas como lo son sólidos los cuales pueden ser orgánicos e inorgánicos, entre los inorgánicos están el nitrógeno, fósforo, carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos y sustancias tóxicas como arsénico, cianuro, cadmio, cromo, cobre, mercurio, plomo y zinc y entre los orgánicos se encuentran compuestos nitrogenados y no nitrogenados. Los nitrogenados son proteínas, ureas, aminas y aminoácidos y los no nitrogenados son principalmente celulosa, grasas y jabones. (Seoanez Calvo, 1995)

El color en las aguas residuales se debe al material coloidal, sólidos suspendidos y compuestos en solución, el color sirve de indicador para determinar el tipo de aguas residual ya sea doméstica o industrial. Las aguas residuales domésticas frescas son de color gris oscuro y a medida que pasa el tiempo con la formación sulfuros metálicos se transforma en negro. (Seoanez Calvo, 1995)

El olor generado en las aguas residuales surge por la descomposición anaerobia de materia orgánica. (Seoanez Calvo, 1995)

En cuanto a las características químicas se agrupan tres categorías: Materia orgánica, compuestos inorgánicos y componentes gaseosos. (Seoanez Calvo, 1995)

Dentro de las características biológicas del agua se encuentra la presencia de diferentes organismos que cierran ciclos biogeoquímicos de elementos como el azufre, el carbono, el nitrógeno o el fósforo. (Seoanez Calvo, 1995)

Los componentes biológicos se pueden manifestar en las siguientes situaciones según (Seoanez Calvo, 1995):

|



Gráfico 2. Esquema manifestación de componentes biológicos. Modificado de: (Seoanez Calvo, 1995)

En las Aguas residuales también se puede encontrar virus los cuales representan un riesgo sanitario, estos pueden tener origen de las excretas del hombre y/o animales domésticos.

Muchos de los tipos de virus son inmunes a tratamientos y más si se considera su capacidad de propagarse con una representación muy pequeña; por lo anterior es importante restringir el consumo de aguas residuales y especificar tratamiento y uso con el fin de minimizar las condiciones de riesgo.

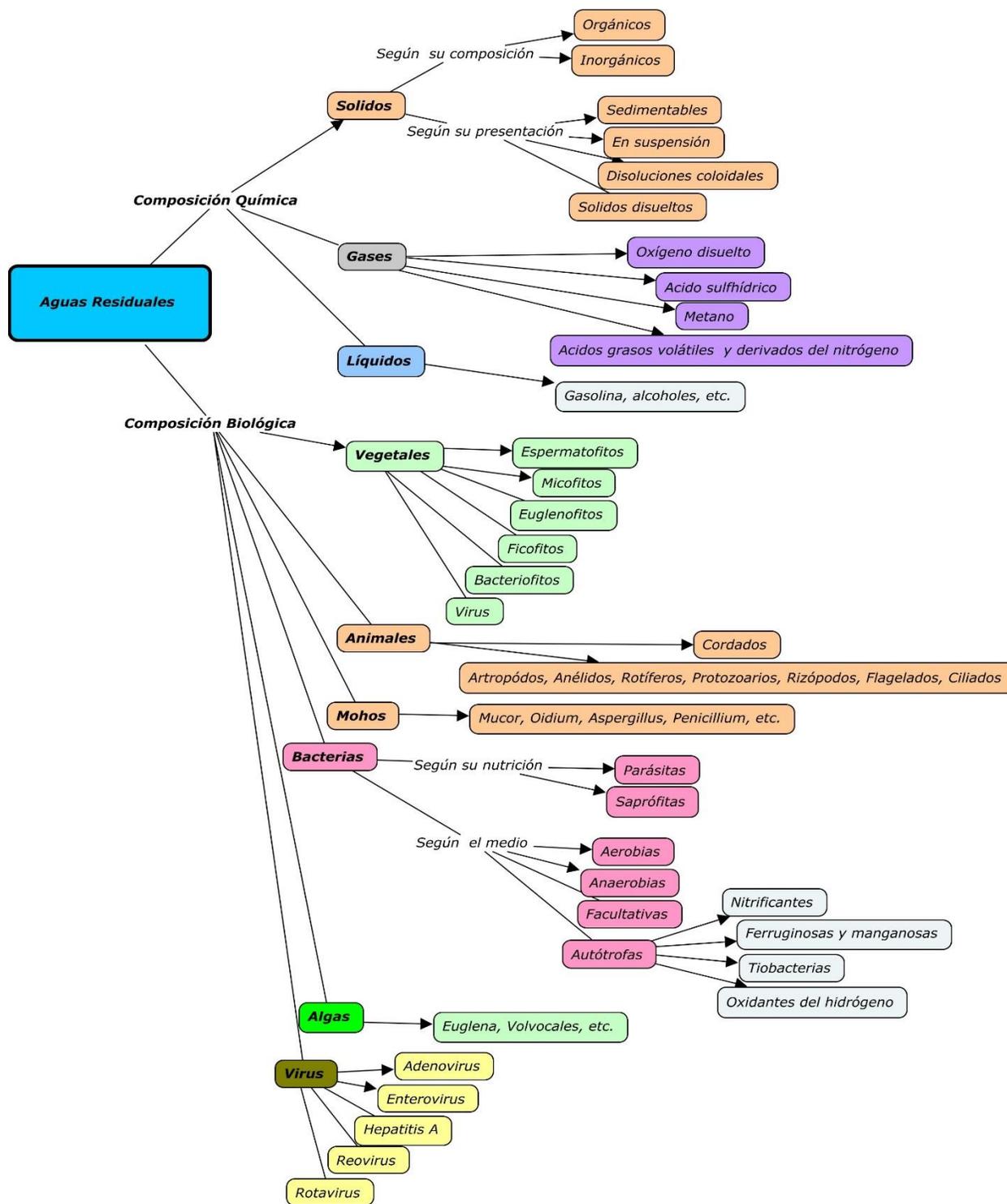


Gráfico 3. Esquema Composición de las aguas residuales. Modificado de: (Seoanez Calvo, 1995).

4.2.3 Procesos biológicos

Los tratamientos biológicos para tratar aguas residuales se fundamentan en fenómenos naturales, de degradación, de metabolismo y consumo de nutrientes; todo lo anterior llevado a cabo mediante procesos aerobios anaerobios y facultativos que permiten que se pueda realizar fotosíntesis, movilidad o estabilidad de los microorganismos, dichos microorganismos dependen de características del medio para poder crecer o proliferarse, entonces para su desarrollo es importante la temperatura, concentración de iones hidrógeno $[H]^+$ presentes Ph, acidez, presencia de productos tóxicos, metales pesados, químicos, etc. (Seoanez Calvo, 1995)

Las aguas residuales han sido tratadas mediante mecanismos aerobios (Tratamiento convencional) desde finales del siglo XIX y fue a mediados de los años 60' que se empezó a utilizar el mecanismo anaerobio pero no precisamente por las aguas residuales si no por un déficit energético.(Orozco, 2005).

Actualmente se utilizan ambos tratamientos en aguas residuales según la característica de purificación del agua que sea requerida(Orozco, 2005).

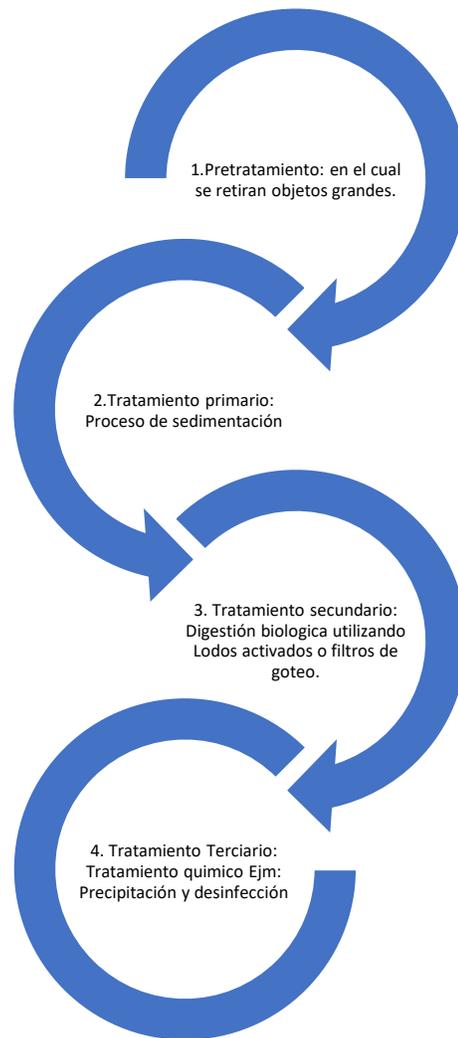


Gráfico 4. Diagrama general de tratamiento de aguas residuales. Modificado de: (Orozco, 2005).

Proporcional al crecimiento demográfico se puede observar el incremento en la generación de aguas residuales. En vista de lo anterior la ingeniería se enfrenta a la necesidad de desarrollar tecnologías limpias eficientes y económicamente viables para el tratamiento de las aguas residuales. (Arias, 2003).

El desarrollo de tratamientos de las aguas residuales en las últimas décadas ha estado en camino a entender los procesos de depuración propios de la naturaleza, es para el caso los biotratamientos en aguas residuales los cuales son llevados principalmente por bacterias, las cuales se desarrollan y obtienen su sustrato del agua contaminada. (Arnáiz, Isac, & Lebrato, 2000).

En Colombia en la Bahía de Cartagena, utilizando metodologías de aislamiento se han identificado bacterias del género *Staphylococcus*, *Bacillus* y *Pseudomonas* las cuales cuentan con una alta capacidad para remover mercurio del agua residual; adicionalmente se está investigando sobre bacterias del género *Serratia* y *Pseudomonas* que degradan el Malathion el cual es un plaguicida y bacterias que podrían degradar la gasolina. (M. Gómez et al., 2006).

Investigaciones realizadas en el territorio colombiano en la región caribe y pacífica, permitió recolectar sedimentos de los cuales se aislaron 145 cepas bacterianas entre Gram negativos y Gram positivos con morfologías bacilares y cocoides. El hecho que estas bacterias se desarrollen en ecosistemas impactados permite deducir, no solo que hay una adaptación a las sustancias contaminantes, si no también, la capacidad de dichas bacterias para la degradación. En la investigación se consideró importante utilizar la técnica de recuentos de microorganismos viables, porque permitió establecer que bacteria posee la capacidad de sobrevivir a condiciones medioambientales particulares, transformando al mismo tiempo los contaminantes en energía y biomasa, en un ambiente sometido a un gran impacto por contaminantes. (M. Gómez et al., 2006)

Según el anterior estudio desarrollado en Colombia se identifica que para la degradación de hidrocarburos son óptimas las cepas encontradas en la región caribe y pacífica y son las correspondientes al género *Klebsiella sp.*, *Pseudomonas sp.*, *Flavimonas sp.*, *Kluyvera sp.*,

Ralstonia sp., *Achromobacter sp.*, *Brevibacillus sp.* y *Bacillus sp.* Para el caso de los plaguicidas organoclorados se identificaron géneros bacterianos *Acinetobacter sp.*, *Rahnella sp.*,

Pseudomonas sp., *Stenotrophomonas sp.*, *Brevibacillus sp.* (M. Gómez et al., 2006)

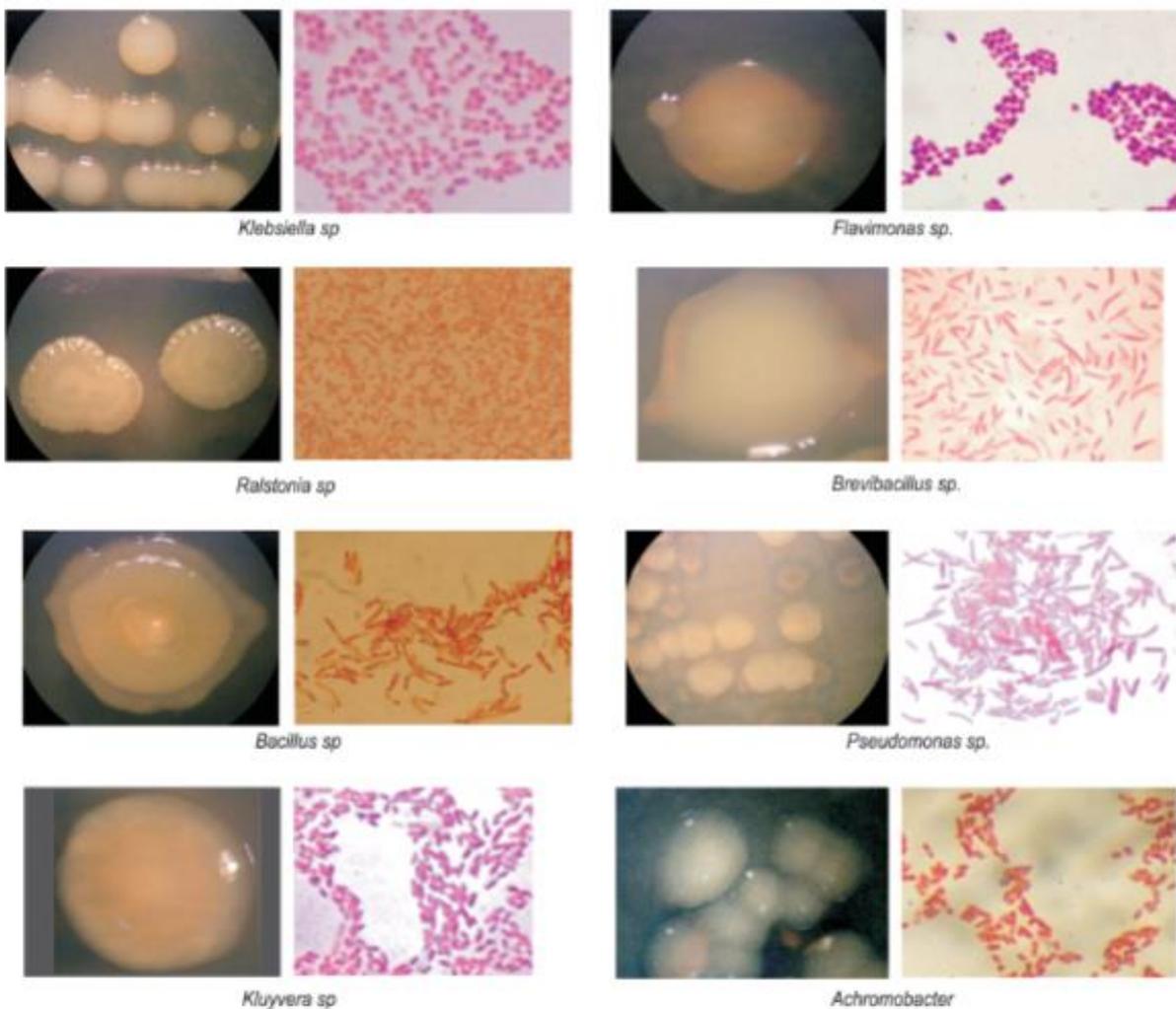


Ilustración 2. Fotografías macroscópicas y microscópicas de las cepas bacterianas pertenecientes al cultivo mixto degradador de hidrocarburos del petróleo. Fuente: (M. Gómez et al., 2006).

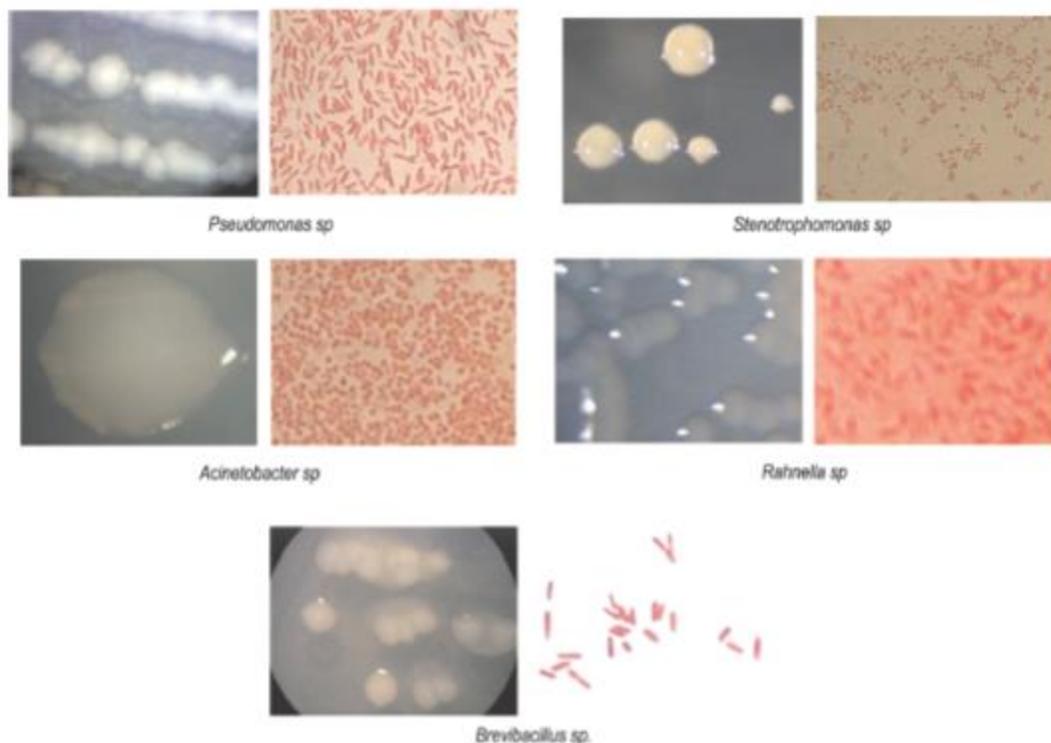


Ilustración 3. Fotografías macroscópicas y microscópicas de las cepas bacterianas pertenecientes al cultivo mixto degradador de plaguicidas organoclorados. Fuente: (M. Gómez et al., 2006)

La bioprospección en el tratamiento de las aguas residuales contaminadas con pesticidas actualmente no ha sido desarrollada, sin embargo, se han desarrollado algunas tecnologías biológicas que con el tiempo pueden tomar fuerza. La biodegradación de pesticidas en el agua residual por medio de bacterias y hongos, puede realizarse mediante procedimientos de bioestimulación que mejoran la actividad microbiana, generalmente esta mejora se realiza por medio de sustratos potencialmente limitantes o nutrientes para el entorno. (Helbling, 2015)

Las investigaciones con relación a la bioestimulación tienen como objetivo lograr la manipulación del medio para poder degradar a futuro más pesticidas, lo anterior se puede colocar

en práctica teniendo en cuenta que la biodiversidad, se asocia positivamente y significativamente con las tasas de biotransformación colectiva de contaminantes orgánicos. Los microorganismos en general expresan un mayor número de genes catabólicos bajo condiciones oligotróficas lo que permite a las bacterias aprovechar la mayor cantidad de sustratos.(Helbling, 2015)

Desde hace varios años se ha hablado de comunidades mixtas de bacterias para estudiar las interacciones entre las poblaciones de células y las interacciones celulares-celulares fundamentales, pero hoy en día esta comunidad mixta de bacterias resulta ser un tema interesante de estudio para la biología y la ingeniería ambiental, en donde un cocultivo es una configuración de cultivo celular, en el que dos o más poblaciones de células se cultivan con algún grado de contacto entre ella, lo anterior permite generar amplias aplicaciones para las industrias y procesos medioambientales.(Kang, Kwon, & So, 2016)

Aunque actualmente se desconoce los efectos de los ambientes contaminados con metales en el crecimiento de mezclas bacterianas, se ha investigado la capacidad de remediación de metales pesados por cultivos bacterianos puros y mixtos para aplicaciones de proceso de biorremediación, para el caso se ha analizado las cepas bacterianas que incluyen *Viridibacillus arenosi* B-21 (B-21), *Sporosarcina soli* B-22 (B-22), *Enterobacter cloacae* KJ-46 (KJ-46) y *E. cloacae* KJ-47 (KJ-47), bajo condiciones a 30 ° C en YA (extracto de levadura 20 g / L y sulfato de amonio 10 g / L a pH 7).(Kang et al., 2016)

El estudio anterior permitió descubrir que los consorcios bacterianos son un método muy efectivo en comparación con los métodos de cultivo individuales. Los consorcios bacterianos mostraron mayor tasa de crecimiento, actividad ureasa y resistencia a metales pesados que el cultivo individual de la cepas. Los consorcios bacterianos exhiben una capacidad de biorremediación de metales pesados considerablemente mayor que los cultivos individuales, lo

que podría redundar en una mayor densidad de células bacterianas a altos niveles de metales pesados. Según los resultados de las pruebas de columna, se observaron mayores eficiencias de biorremediación para plomo, mientras que las más bajas se detectaron en la eliminación para cadmio. (Kang et al., 2016)

Tabla 1

Tabla procesos aerobios y anaerobios según (Seoanez Calvo, 1995)

<i>Procesos aerobios</i>	<i>Procesos Anaerobios</i>
<i>Lodos Activados</i>	Lagunas Anaerobias
<i>Lechos Bacterianos</i>	Digestores
<i>Lagunas de oxidación</i>	Filtros Anaerobios
<i>Lagunas aireadas</i>	
<i>Depósitos de oxidación</i>	

Modificado de: (Seoanez Calvo, 1995)

4.2.3.1 Carbono orgánico

Para la depuración de carbono orgánico los microorganismos forman un compuesto a través de la vía disimilatoria (reacciones de producción de energía) y la vía asimilatoria (reacciones de síntesis). En los tratamientos aerobios de aguas residuales se destacan los géneros *Bacillus*, *Alcaligenes*, *Moraxella*, *Flavobacterium*, *Acinetobacter*, *Pseudomonas*, *Arthrobacter*; *Aeromonas*, *Klebsiella*, *Haliscomenobacter*, *Gordona*, etc. A continuación se describe el procedimiento según (Arnáiz et al., 2000):

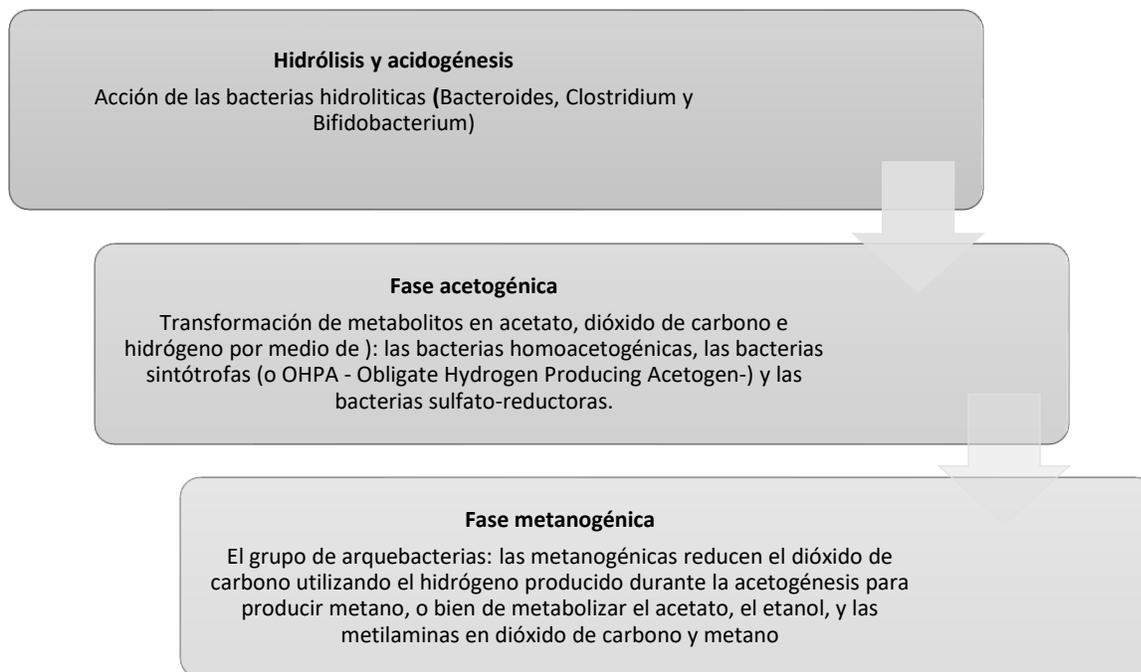


Gráfico 5. Procedimiento de depuración de carbono orgánico. Modificado de: (Arnáiz et al., 2000)

4.2.3.2 Reducción de carbono y biotransformación de sulfato cálcico hidratado (Fosfogeso) por medio de bacterias sulfato reductoras

Las aguas residuales producto de la refinación de petróleo son ricas en varios compuestos es decir contienen hidrocarburos, alcoholes, aldehídos y fenoles. Sin embargo, los fenoles son el resultado del uso de solventes o subproductos del proceso. La cantidad de aguas residuales en las refinerías depende de la calidad del petróleo crudo y la medida en que se procesa y promedia 10-18 m³ por tonelada de crudo procesado.(Wolicka, 2008)

La mezcla del agua residual de las refinarias de petróleo junto con las demás aguas residuales industriales podría considerarse como un óptimo medio de cultivo para bacterias sulfato-reductoras ya que en residuos que tengan Fosfogeso, hay cantidades considerables de iones de sulfato.(Wolicka, 2008)

En un estudio llevado a cabo por Wolicka en el 2008, se usó una para aislar microorganismos del suelo, en lugares cercanos a estaciones de gasolina, campos militares, parqueaderos, refinería de petróleo, monta llantas, aguas residuales y aguas residuales purificadas utilizando el método de lodos activados.(Wolicka, 2008)

Los microorganismos del suelo se cultivaron usando el método de "microcosmos" y los de las aguas residuales de refinería de petróleo se cultivaron utilizando el cultivo de agitación en agar.(Wolicka, 2008)

En los resultados del anterior estudio se estableció que, en los cultivos de aguas residuales, la mayor reducción simultánea de demanda química de oxígeno DQO y sulfatos para microorganismos aislados se generó en agua residuales de monta llantas y aguas residuales provenientes de la refinería de petróleo. Estos microorganismos lograron una purificación de las aguas residuales aproximadamente en un 90%, con biotransformación simultánea de 53 y 38% de fosfogeso / L para el caso.(Wolicka, 2008)

En general para los cultivos de bacterias sulfato-reductoras en aguas residuales provenientes de la refinería de petróleo, se aprecia un 35% de pérdida en la masa de fosfogeso adicional no se encontró componentes químicos o minerales distintos del yeso y celestina y el conjunto o consorcio de bacterias sulfato-reductoras pueden utilizar los sulfuros, que son los productos de la

reducción de sulfatos, como fuente de energía, oxidándolos hasta azufre elemental o incluso sulfatos.(Wolicka, 2008)

4.2.3.3 El nitrógeno

El nitrógeno es un contaminante muy importante en los cuerpos de agua, este contaminante ha aumentado debido al crecimiento industrial y agrícola y ha llegado a los cuerpos de agua en forma de amonio, nitrato y nitrito.

La nitrificación se desarrolla de manera aerobia por medio de microorganismos Gram-negativos lito autotróficos que pertenecen a la familia Nitrobacteriaceae, el proceso de la nitrificación consiste de transformar el amonio a nitrito por medio de las bacterias de los géneros Nitrosomonas y Nitrosolobus, y posteriormente el nitrito a nitrato por medio de las bacterias del género Nitrobacter y Nitrosococcus mediante la acción de la enzima nitrito óxido-reductasa, finalmente para obtener N_2 se realiza un proceso de desnitrificación el cual es anaerobio a través de las bacterias *Alcaligenes*, *Paracoccus*, *Pseudomonas*, *Thiobacillus* y *Thiosphaera*.(Cervantes, Pérez, & Gómez, 2000).

Los investigadores han descubierto un método anaerobio por el cual el amonio y el nitrito se transforma en Nitrógeno atmosférico N_2 , a este proceso biológico se le conoce como "ANAMMOX" y es lito autotrófico. El método tiene aplicación en el tratamiento de aguas residuales con una cantidad importante de nitrógeno y cantidad limitada de materia orgánica.(Cervantes et al., 2000).

4.2.3.4 "ANAMMOX"

El "ANAMMOX" y la desnitrificación heterotrófica en conjunto pueden ser efectivos para el tratamiento de aguas residuales, ya que en el mismo reactor donde se lleva a cabo el proceso "ANAMMOX" se puede agregar nitrato el cual eliminaría el amonio, dando por resultado la eliminación de este último junto con la materia orgánica.(Cervantes et al., 2000)

A pesar de que existen grandes diferencias entre las bacterias nitrificantes y desnitrificantes es posible utilizarlas en un mismo reactor aerobio para el tratamiento de la aguas residuales, en el cual se forman capas en los gránulos del reactor permitiendo que en las capas internas se lleve a cabo procesos de desnitrificación y en las capas externas procesos de nitrificación, los investigadores atribuyen este proceso en conjunto a *Thiosphaera pantotropha*, bacteria capaz de efectuar la nitrificación heterotróficamente y la desnitrificación bajo aerobiosis(Cervantes et al., 2000).

4.2.3.5 Biotransformación de productos farmacéuticos por bacterias oxidantes de amoníaco en procesos de tratamiento de aguas residuales

La biotransformación de fármacos por las bacterias oxidantes de amoníaco ha evolucionado rápidamente en los últimos años, actualmente se están investigando varios compuestos, vías y productos de biodegradación relevantes bajo diversas condiciones.(Xu, Yuan, & Ni, 2016)

Los productos farmacéuticos se encuentran en aguas residuales, estos llegan al afluente como resultado de las necesidades fisiológicas del ser humano, estos fármacos se encuentran en niveles que oscilan entre $\mu\text{g L}^{-1}$ o ng L^{-1} , lo cual amenaza la existencia de varios microorganismos, dichos microorganismos pueden metabolizar algunos compuestos del agua residual pero algunos fármacos no llegan a ser metabolizados por lo cual la mejor manera para su eliminación es a través de cometabolismo.(Xu et al., 2016)

Los productos farmacéuticos pueden ser biodegradados por los microorganismos pertinentes y esto debe realizarse con ayuda obligatoria de un sustrato de crecimiento como compuestos o nutrientes fácilmente degradables, por ejemplo, el bezafibrato, el naproxeno y el ibuprofeno mostraron diferentes grados de transformación y mineralización en presencia de fuente externa de carbono mientras que no se degradaron metabólicamente.(Xu et al., 2016)

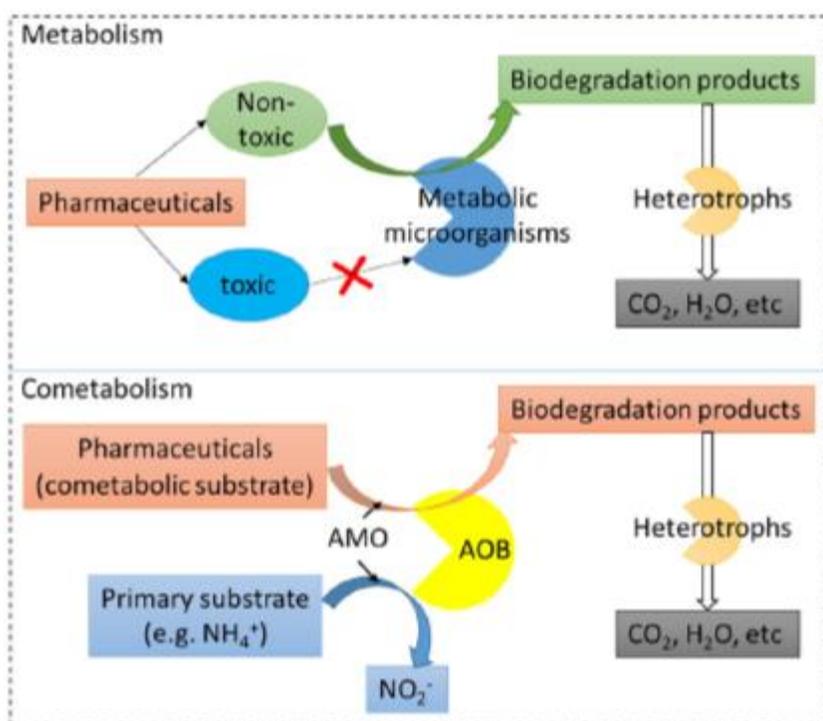


Gráfico 6. Metabolización de amoníaco a través de bacterias. Fuente: (Xu et al., 2016)

La biodegradación de productos farmacéuticos por bacterias oxidantes de amoníaco se realiza de forma cometabólica, el amoníaco se utiliza como sustrato y fuente de energía crecimiento e inducción enzimática, durante el proceso de nitrificación, las bacterias oxidantes de amoníaco toman el papel de convertir NH_4^+ a NO_2^- - que es capaz de degradar una amplia gama de

compuestos aromáticos a través de la biodegradación cometabólica probablemente debido a su enzima no específica AMO.(Xu et al., 2016)

Las bacterias oxidantes de amoníaco pueden mejorar significativamente la extracción de sustancias farmacéuticas, este proceso está asociado a la tasa de nitrificación en el tratamiento de aguas residuales, su proceso cometabólica puede incluir reacciones incluyendo oxidación e hidroxilación durante la nitrificación, la formación de diferentes productos de transformación en comparación biodegradación metabólica.(Xu et al., 2016)

4.2.3.6 Lodos activados y microorganismos

Mediante la implementación de lodos activados se puede apreciar como las bacterias anaerobias van disminuyendo con relación al crecimiento que realizan las aerobias cuya representación la cumple los microbios proteolíticos que degradan las proteínas convirtiéndolas en residuos amoniacales, entre la bacteria autoras de esta degradación se encuentran las bacterias fluorescentes, el *Bacillus proteus*, el *Bacillus subtilis* y el *Bacillus mesentericus*. Las bacterias encargadas de transformas los compuestos amoniacales en nitritos y posteriormente nitratos son *Nitrosomas* y las *Nitrobacter* adicional las bacterias *Bacterium coli* y *Bacillus aerogenes* degradan los hidratos de carbono en anhídrido carbónico, hidrogeno, ácido láctico, acido butírico, los procesos clarificantes son realizados por microorganismos filamentosos como el *Sphaaerotilus natans*, *Cladothrix dichotoma*, *Geotrichoides paludosus*.(Seoanez Calvo, 1995).

En este proceso se utiliza una gran concentración de bacterias facultativas en suspensión, las cuales oxidan la materia orgánica y transforman los nutrientes produciendo polisacáridos y materiales poliméricos que ayudan en la floculación de la biomasa microbiana. Los principales géneros son: *Zooglea*, *Pseudomonas*, *Flavobacterium*, *Alcaligenes*, *Bacillus*, *Achromobacter*, *Corynebacterium*, *Comomonas*, *Brevibacterium*, *Acineto bacter*, *Organismos Filamentosos* (*Sphaerotilus*, *Beggiatoa*), Bacterias autotróficas nitrificantes (*Nitrosomonas* y *Nitrobacter*) y bacterias sulfurosas fototróficas (*Rhodospirillaceae*). (Moeller & Tomasini, 2010)

4.2.3.7 Lechos bacterianos y microorganismos

Durante el proceso de lechos bacterianos se crece un género bacteriano llamado *Zooglea* la cual está compuesta por microorganismos, cuando el agua residual circula por el lecho se producen procesos aerobios y anaerobios. Los procesos aerobios por ejemplo son realizados por las bacterias *Sphaerotilus* las cuales generan un color gris claro y las *Leptomitus*. (Seoanez Calvo, 1995)

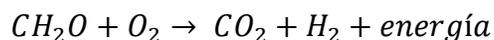
Entre los hongos comúnmente encontramos los *Fusarium* los cuales si se encuentran en gran concentración se distinguen por su color naranja o rosa, adicional se encuentran algas de tipo *Oscillatoria*, principalmente encontramos cianofíceas, clorofíceas y diatomeas. (Seoanez Calvo, 1995).

4.2.3.8 Lagunas de oxidación y microorganismos.

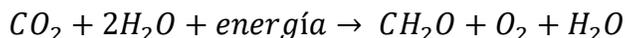
Las lagunas de oxidación obtienen el oxígeno principalmente de procesos de fotosíntesis y su rendimiento depende del equilibrio entre bacterias—algas, es decir si hay más actividad de las bacterias abra demasiado lodo, poco oxígeno y malos olores perro si en cambio el exceso es por la actividad de las algas se aumentará la masa vegetal y la laguna no funcionara óptimamente. (Seoanez Calvo, 1995)

El método de lagunas de oxidación consiste en mantener una laguna de superficie extensa en condiciones aerobias con una buena luminosidad, viento y meteorología adecuados. En este proceso cobra gran importancia las bacterias y las algas en las reacciones bioquímicas. Las bacterias heterótrofas asimilan la materia orgánica, en la profundidad de la laguna se producen reacciones anaerobias las cuales reducen la demanda biológica de oxígeno DBO y la cantidad de lodos. Al paso del agua residual por la laguna, las bacterias asimilan los lodos y producen iones de fosfato, nitrato, amonio y anhídrido carbónico; teniendo estas últimas condiciones se favorece con ayuda de la energía solar el crecimiento de algas, estas algas o el conjunto de ellas son el sustratos para bacterias heterótrofas.(Seoanez Calvo, 1995)

Bacterias



Algas



4.2.3.9 Biodegradación de aguas residuales de porcicultura con el uso de microalgas.

El desarrollo de la agricultura y la alta concentración de carbono y nutrientes ha superado la capacidad de autodepuración de varios afluentes por lo cual se requiere tecnologías limpias y económicamente viables para el tratamiento de dichos afluentes. (Gonzalez, Marciniak, Villaverde, García-Encina, & Muñoz, 2008)

El proceso de lodos activados implica un alto consumo de energía para la oferta de O₂ y no permite el reciclaje de nutrientes, por otro lado, aunque enérgicamente más favorables que sus contrapartes aeróbicas, los procesos anaerobios frecuentemente están limitados por las bajas temperaturas sobre todo en los países de Europa y la ausencia de nitrógeno y fosforo. Según lo anterior, la aplicación de sistemas de cianobacterias para la recuperación de efluentes de granjas porcícolas o ganaderos proporciona la producción simultánea in situ de O₂ de microalgas mediante fotosíntesis y permite reciclar nutrientes mediante la asimilación de N y P en la biomasa algal. (Gonzalez et al., 2008)

Cuando las microalgas son expuestas a la luz producen el O₂ el cual es utilizado por las bacterias aerobias para mineralizar la materia orgánica y oxidar NH₄⁺. Posteriormente, las microalgas consumen el CO₂ liberado por las bacterias, mitigando la emisión de CO₂. (Gonzalez et al., 2008)

Los estudios realizados presentan la biodegradación de la fracción soluble de aguas residuales de granjas porcícolas a través de la oxigenación fotosintética a concentraciones altas de carbono y NH₄⁺, lo anterior en presencia del alga *Chlorella sorokiniana* la cual es capaz de soportar la

degradación de las aguas residuales a tasas y eficiencias comparable a los sistemas de lodos activados.(Gonzalez et al., 2008)

4.2.3.10 Biorremediación del drenaje ácido de minas por medio de Algas.

El uso de algas ha resultado ser efectivo para remover contaminantes orgánicos e inorgánicos, este método ha sido utilizado desde los años 90', la mayoría de los estudios sobre algas se han enfocado a la producción de biodiésel, pero actualmente se ha demostrado la capacidad de fitorremediación por parte las algas en cuanto al tratamiento de metales pesados. Varias investigaciones se enfocan en *Lepocinclis* sp. y *Klebsormidium* sp. Por su buen crecimiento y distribución, pero adicional estas investigaciones demuestran la capacidad de las algas para trabajar en conjunto con los hongos en la remoción de metales pesados, lo anterior debido a que estos microorganismos cuentan con una gran simbiosis y sinergia.(Bwapwa, Jaiyeola, & Chetty, 2017)

La actividad de las algas y hongos puede llegar a ser amenazada por condiciones como la sobrecarga de metales pesados, pH muy bajos y poca disponibilidad de carbono orgánico y fosfatos.(Bwapwa et al., 2017)

En las investigaciones realizadas con algas es importante evaluar varias especies, sus mecanismos de remoción y su crecimiento, pH, temperatura, tiempo de residencia y tasa de flujo del afluente con metales pesados. En el medio hay muchas especies de algas que surgen de manera natural; sin embargo, algunas pueden ser clasificadas como extremófilas, ambas

requieren y se reproducen en condiciones ambientales extremas o inusuales.(Bwapwa et al., 2017)

Diferentes estudios indican que el uso de algas en fitorremediación ha sido efectivo y tiene potencial para futuras aplicaciones. La composición de los drenajes ácidos de minas varía de un lugar a otro debido a la diferencia de pH, temperatura y oxígeno contenidos en cada sitio. Estas variaciones implican que las diferentes especies de microorganismos acidofílicos con diferentes características fisiológicas serán encontradas en cada lugar donde los drenajes ácidos de minas son generados. Contribuciones particulares como la creación de sulfatos reduciendo regiones anaeróbicas en sistemas pasivos de agua incrementan la efectividad de estos sistemas en la remoción de metales pesados y otros contaminantes de aguas residuales.(Bwapwa et al., 2017)

Estos sistemas resultan ser muy beneficiosos en cuanto a su alta alcalinidad en la corriente para facilitar la precipitación de metales arrastrados como poco solubles, pero en cuanto a las sales de hidróxido y óxido pueden ser recuperables económicamente.(Bwapwa et al., 2017)

Existen nuevas tecnologías como sistemas de barreras permeables activas que cuentan con una gran efectividad para futuras aplicaciones para la remoción de metales pesados en drenajes ácidos de minas.(Bwapwa et al., 2017)

4.2.3.11 Biorremediación de aguas rechazadas del proceso lodos por la macroalga (Ulva lactuca, Chlorophyta)

El agua de rechazo es otro tipo interesante de agua residual desde un punto de vista de la fitorremediación, el lodo sedimentado de las plantas de tratamiento de aguas se utiliza para generar biogás a través de la digestión anaeróbica, posteriormente antes de ser direccionado a

terrenos para fertilizar el lodo se deshidrata. El agua de drenaje rica en nutrientes resultante se denomina agua de rechazo, como la concentración de nutrientes del agua de rechazo es relativamente alta no puede ser descargada al afluente por lo que las investigaciones proponen la eliminación de los nutrientes disueltos en el agua de rechazo por medio del cultivo de macroalgas, reciclando de esta manera el nitrógeno biodisponible. (Sode et al., 2013)

Con respecto al cultivo de algas, el agua de rechazo tiene varias ventajas en comparación con las aguas residuales tratadas:

- La relación entre los nutrientes inorgánicos y orgánicos es más alta, ya que la digestión anaeróbica remineraliza hasta cierto punto el material orgánico.
- La concentración de nutrientes del agua de rechazo es relativamente constante.
- El agua de rechazo es relativamente clara lo que genera mayor grado de disponibilidad de luz para la fotosíntesis de algas en el fluido.
- El agua de rechazo es más segura e higiénica, ya que la digestión anaeróbica provoca un saneamiento de los patógenos que están inevitablemente presentes en aguas residuales crudas y tratadas.

La mayoría de las macroalgas crecen en la profundidad del agua y son capaces de absorber nutrientes disueltos en toda la superficie, *Ulva (Chlorophyta)* es un género verde de macroalga gracias a su morfología foliar cuenta con muy buena absorción de nutrientes y altas tasas de crecimiento. (Sode et al., 2013)

La macroalga (*Ulva lactuca, Chlorophyta*) son ricas en proteínas y el contenido de metales pesados no excede los valores límites, por lo cual después de la biorremediación puede ser utilizada para el uso en la alimentación animal o la mejora del suelo, ya que los elementos

patógenos fueron eliminados en el proceso anaerobio de los lodos, adicional la macro alga tiene un efecto antibacteriano en el agua residual, por lo tanto, se reducen los inconvenientes relacionados con la salubridad de las aguas residuales.(Sode et al., 2013)

4.2.3.12 Estanques anaerobios y microorganismos

Los estanques anaerobios hacen parte de tratamientos primarios y tienen por función destruir y estabilizar la materia orgánica, generalmente son un poco más grandes que los aerobios ya que no presentan la necesidad del aire y el sol y su eficiencia se da bajo temperaturas entre los 16 y los 20° C , a estos estanques se le pueden agregar bicarbonato sódico, el carbonato amónico y cal, las cantidades de las anteriores sustancias deben ser medidas con cuidado para no alterar el pH y afectar la actividad bacteriana. Los gases como el metano, anhídrido carbónico y gases inertes son producto de la digestión sirven para acelerar y facilitar el ataque de los microorganismos, al final del tratamiento se obtienen reducciones de DBO hasta un 90 % y el agua puede utilizarse en el suelo.(Seoanez Calvo, 1995)

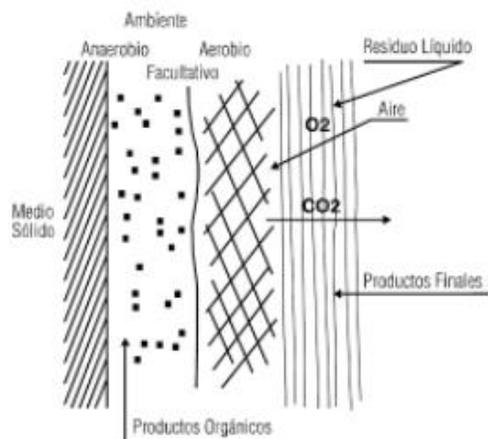


Ilustración 4. Filtros biológicos. Fuente: (Orozco, 2005)

En los filtros biológicos se utilizan cultivos bacterianos fijados a un medio sólido donde en la parte exterior se realiza el proceso aerobio por medio de las bacterias del género *Bacillus sp.*, en la parte central es un proceso facultativo generado por las bacterias del género *Pseudomonas*, *Micrococos* y *Flavo bacterias* finalmente en el interior se lleva a cabo el proceso en condiciones anaerobias por bacterias *desulfovibrio*. (Orozco, 2005)

4.2.3.13 Microorganismos y las lagunas de estabilización

Entre las lagunas de estabilización se encuentran las facultativas, aireadas-facultativas, completas mixtas aerobias, Anaerobias, estanques de oxidación y lagunas terciarias, en cualquiera de ellas el proceso consiste en retener el afluente por un tiempo determinado mientras los microorganismos eliminan el DBO₅, en la parte superficial de la laguna hay actividad por parte de bacterias aerobias y facultativas-anaerobias quienes metabolizan la materia orgánica liberando

anhídrido carbónico y oxígeno para el crecimiento de nuevas bacterias y a su vez este conglomerado de bacterias sirve de sustento para los protozoarios. (Seoanez Calvo, 1995)

Para el caso, en las lagunas de estabilización facultativas se concibe una relación simbiótica entre algas y bacterias, donde las bacterias consumen la materia orgánica y las algas le suministra el oxígeno, los sólidos generados por esta actividad se decantan para ser tratados de manera anaerobia. (Orozco, 2005).

En las lagunas de estabilización, cuando se va decantando los residuos de la actividad microbiana y demás se forma en el fondo lodos con microflora anaerobia dando paso a procesos de fermentación cuyo resultado es el metano y sulfuros. (Seoanez Calvo, 1995)

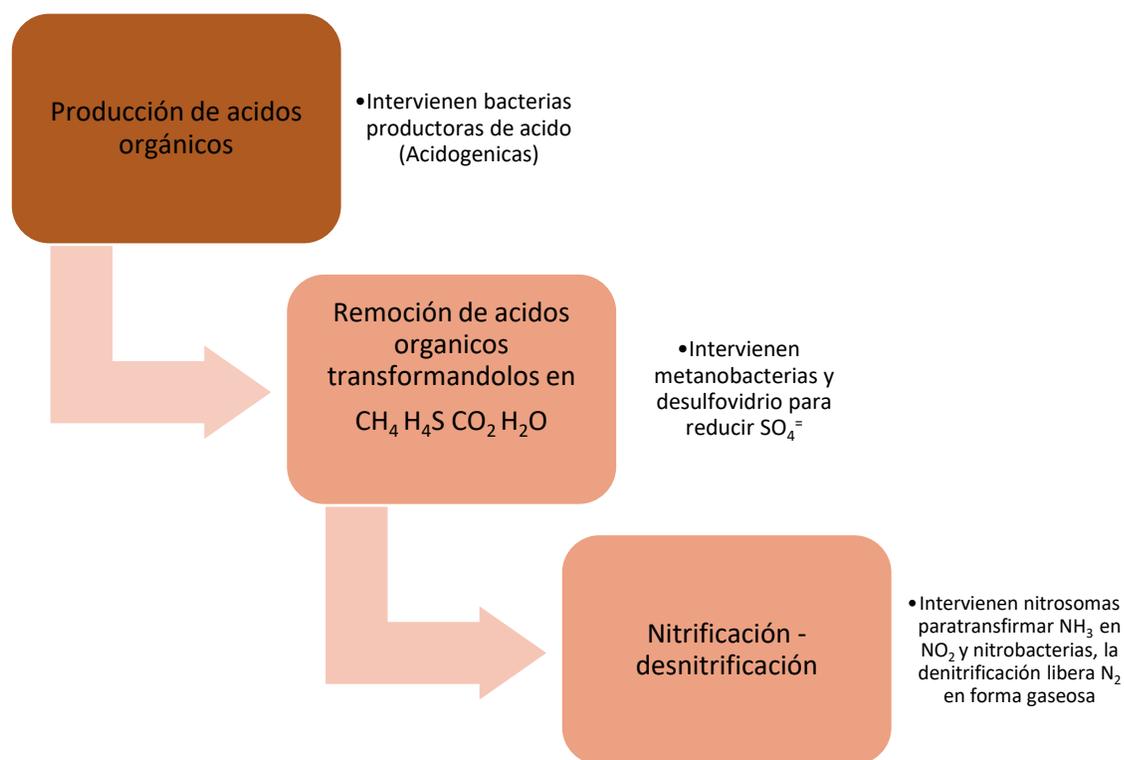


Gráfico 7. Proceso Anaerobio de aguas residuales. Modificado de: (Seoanez Calvo, 1995)

4.2.3.14 Remoción de Cromo por hongos

La separación de metales a través de hongos se realiza por medio de la bioacumulación y reacciones de óxido-reducción asociadas con enzimas o de forma pasiva independiente del metabolismo por medio de quelación, quimiosorción, complejación y bioadsorción. En la bioadsorción la biomasa fúngica actúa como intercambiador biológico uniendo y concentrando metales pesados a partir de soluciones acuosas. Lo anterior se debe a que la pared celular cuenta con quitina, quitosano y glucanos lo cual también permite utilizarla como bioadsorbente orgánico, económicamente asequible y de fácil obtención para procesos agroindustriales.(Gómez-Bertel et al., 2008)

Para la remoción de Cromo se han realizado estudios utilizando hongos *Pleurotus ostreatus*, *Phanerochaete chrysosporium*, *Trametes versicolor* y *Aspergillus niger* en agua residual proveniente de curtidoras, más sin embargo *P. chrysosporium* demostró ser hipertolerante a elevadas concentraciones de cromo, con la información anterior se establece que esta alternativa es viable económicamente sobre todo para la remoción de metales pesados, ya que se adapta a los cultivos en sustratos agroindustriales y genera buenos rendimientos en cuanto a la biomasa.(Gómez-Bertel et al., 2008)

4.2.3.15 Biotransformación de cromo hexavalente en nanopartículas de óxido de cromo (III) extracelulares utilizando *Schwanniomyces occidentalis*

El cromo se encuentra en la naturaleza en diferentes estados de oxidación como el trivalente [Cr (III)] y hexavalente [Cr (VI)] los cuales son los más comunes. El cromo Cr (VI) es considerado potencial negativo para el ambiente, se han realizado estudios donde involucran procesos suaves para la desintoxicación de Cr (VI) con productos como las nanopartículas de Cr₂O₃ las cuales jugarían un papel muy importante en su tratamiento debido a sus características como catalizadores, material de revestimiento y pigmentos.(Mohite, Kumar, & Zinjarde, 2016)

La biotransformación de cromo de potasio hexavalente tóxico (K₂CrO₄) a las nanopartículas de Cr₂O₃ extracelulares se realiza por medio de la levadura *Schwanniomyces occidentalis* la cual también ha sido utilizada para la fabricación de cerveza y la producción de proteína de una sola célula. Teniendo en cuenta que la fuente de iones Cr (VI) fue K₂Cr₂O₄ en agua destilada, el desarrollo del proceso efectúa un cambio de color amarillo a verde profundo lo cual indicaría la biotransformación de los iones Cr (VI) y la posible formación de nanopartículas de Cr₂O₃.(Mohite et al., 2016)

Según los estudios la incubación a 50 ° C favorece la liberación de biomoléculas involucradas en la reducción y estabilización de nanopartículas. *S. occidentalis* .(Mohite et al., 2016)

En las aguas residuales provenientes por ejemplo de industrias de pinturas y cuero se pueden apreciar altos contenidos de iones Cr (VI), pero al implementar la incubación de la levadura *Schwanniomyces occidentalis* se podría controlar la desintoxicación del afluyente y generar productos con valor añadido en forma de Cr₂O₃ en condiciones estáticas y benignas.(Mohite et al., 2016)

4.2.3.16 Sistemas de tratamiento de aguas residuales con plantas

Los sistemas de tratamiento con plantas flotantes se ha utilizado para completar tratamientos secundarios de las aguas residuales, para su aplicación se requiere evitar los tanques de sedimentación y lagunas ya que estas opciones favorecerían el crecimiento de algas las cuales no se podrían depurar periódicamente, también existe restricción en cuanto a la cantidad de fosforo porque las plantas no pueden asimilarlo de forma muy efectiva por lo que se recomienda su eliminación en etapas previas.(METCALF & EDDY, 1998).

Las especies más empleadas para sistemas de tratamiento de aguas residuales son los juncitos de agua, las lentejas de agua y las *hidrocotile umbellata*. (METCALF & EDDY, 1998)

Los jacintos de agua (*Eichhornia crassipes*) son plantas vasculares de agua dulce, estas plantas al mantenerse en agua residuales tienen un tamaño entre 0.5 y 1.2m y su crecimiento es rápido el cual realiza por medio de propagación vegetativa o por semillas, su desarrollo en el agua es de manera horizontal cubriendo el cuerpo de agua y puede verse afectado por: Ineficiencia de la utilización de la energía solar, nutrientes en el agua, métodos de cultivo y factores ambientales. De acuerdo al oxígeno disuelto y al nivel aireación se distinguen tres tipos: aerobios no aireados, aerobios aireados y anaerobios facultativos.(METCALF & EDDY, 1998)

- Aerobio no aireado: Se desarrolla en función de la materia orgánica, eliminando nutrientes (nitrógeno), actualmente es muy utilizado gracias a su excelente rendimiento con una representación muy baja de malos olores y mosquitos.(METCALF & EDDY, 1998)

- Aerobio aireado: En este sistema se permite un aumento de la carga orgánica, requiere menos espacio y no permite la proliferación de mosquitos.(METCALF & EDDY, 1998)
- Anaerobio facultativo: La carga orgánica en este sistema es muy elevada, es susceptible de malos olores y mosquitos por lo cual su uso no es muy frecuente.(METCALF & EDDY, 1998)

Las lentejas de agua (*Lemna spp.*, *Spirodela spp.*, *Wolffia spp.*) son plantas de pequeño tamaño compuestas básicamente por células metabólicamente activas, entre las especies están *Lemna* y *Spirodela*, las lentejas de agua son plantas fluorescentes y tienen muy buena capacidad de reproducción, la especie *Lemna* se puede reproducir 30 veces más rápido que el Jacinto de agua a temperaturas aproximadas a los 27°C, cuentan con raíces cortas que miden menos de 12 mm de longitud y son utilizadas para mejorar la calidad del agua en los estanques de estabilización facultativos disminuyendo la concentración de algas. Para un buen funcionamiento de este sistema se debe tener cuidado con el viento ya que puede desplazar las plantas hacia un costado dejando parte de la superficie del agua despejada lo cual generaría una ineficiencia en el sistema.(METCALF & EDDY, 1998)

La *Hydrocotyle umbellata* es una planta que crece de manera vertical y cuenta con buenas raíces las cuales se entrelazan y forman balsas hidropónicas, en épocas de invierno asimilan mayores cantidades de nitrógeno y fosforo que los juncos de agua.(METCALF & EDDY, 1998).

Para que los sistemas de tratamientos sigan siendo eficaces es necesario cosechar las plantas, por ejemplo, para el Jacinto de agua la cosecha podría realizarse cada 3 o cuatro semanas, una vez se coseche el Jacinto de agua este es puesto a secar para utilizarlo en el suelo y la lenteja de agua que no necesariamente requiere secado puede ser utilizada como alimento para animales.

(METCALF & EDDY, 1998)

4.2.3.17 Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales.

El manejo de las aguas residuales ha generado una gran problemática mundial, en países como Costa Rica, han realizado estudios relacionados a la aplicabilidad de los humedales artificiales en el tratamiento de aguas residuales, ya que han evidenciado estas aguas generalmente se direccionan a unos tanques sépticos para sedimentación y posteriormente, el efluente se infiltra en el subsuelo. Lo anterior es un impacto negativo para la salud pública y para el medio ambiente.(Salazar, Chinchilla, Marín, & Pérez, 2013).

Los humedales artificiales son una tecnología limpia para el tratamiento aguas residuales, su estructura es muy sencilla consta de un material aislante colocado bajo un lecho filtrante de material poroso y una cubierta vegetal de plantas macrófitas las cuales a través de la respiración incorporan oxígeno a través de sus raíces y depuran el agua mediante procesos físicos, químicos y biológicos. Las plantas macrófitas más utilizadas para este sistema son *Typha ssp*, *el Phragmites comunes*, *el Juncos ssp*, *el Schoenoplectus*, *el Carex*, *El papiro*, *Lirio*, *Carrizo* y *Nenúfar*.(Salazar et al., 2013).

En las investigaciones realizadas con la especie *Cyperus papyrus*, conocida popularmente como “papiro”, se estableció que esta especie se desempeña muy bien como macrófita enraizada, al ser perenne, poseer grandes rizomas, y espigas cilíndricas, tolerar temperaturas de 20 a 33°C y pH entre 6 y 8. Las anteriores características descritas hacen que la especie *Cyperus papyrus* sea adaptable a las condiciones climatológicas de la región de Tres Ríos, la Unión, Cartago en Costa Rica.(Salazar et al., 2013)



Ilustración 5. Humedal construido de flujo subsuperficial horizontal en la empresa farmacéutica. Fuente: (Salazar et al., 2013)

En países como Estados Unidos la técnica de humedales artificiales está muy consolidada, pero en países de Europa hasta ahora se está empezando a implementar, por ejemplo, en España se han realizado aplicaciones con rendimientos de eliminación entre 80 a 95 % para la DBO5 y 70 a 95 % para sólidos suspendidos totales SST, como también valores medios de 52 %, 40 % y 43 % para el nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal y fósforo total. La técnica de humedales artificiales también ha llegado a países como Canadá donde se está utilizando para tratar las aguas ácidas de la mina de cobre Bell Copper (British Columbia), donde se obtuvieron resultados de pH desde 3 hasta 6-8 y reducciones del 40% y del 80% de cobre con un tiempo de retención de 12 y 23 días respectivamente. (Ortiz, 2014)

En Colombia el esquema clásico de saneamiento hídrico en zona rurales consiste en algunos casos en tanques sépticos en compañía de filtros Anaerobios. La aplicación de los dos procesos anteriores no cumple con el mínimo del 80 % de remoción en carga de DB05 y DQO, establecido por la legislación colombiana, por lo cual se ha complementado estos procesos con

los humedales artificiales. En las investigaciones realizadas para el tratamiento de aguas por medio de humedales artificiales se han utilizado tres especies de la zona cafetera colombiana:

Typha (*Typ ha s p.*).

Junco (*Juncus sp.*) y *J engibre* (*Renealmia alpiTlCij*), junto con el tanque séptico y los filtros anaerobios, arrojando eficiencias de remoción de 78.1% y 81.14 para DB05 y DQO y en algunas ocasiones hasta del 90% en las dos características.(J. D. V. Gómez, Erazo, Rajas, & Cuervo, 2006).

En la región antioqueña se efectuaron estrategias con humedales artificiales para tratar aguas residuales de granjas porcícolas la cuales tienen una carga orgánica muy elevada que desequilibra el sistema acuático, los humedales artificiales son una técnica muy importante que permite aprovechar los procesos físicos, químicos y biológicos que se presentan al interactuar entre sí el agua, el medio filtrante, las plantas, los microorganismos y la atmósfera.(Arias Martínez, Betancur Toro, Gómez Rojas, Salazar Giraldo, & Hernández Ángel, 2010)

El agua pasa por las plantas filtrándose por sus tallos y raíces de esta manera descomponen las sustancias contaminantes y estabilizan los metales fijándolos a las raíces, en este proceso también interviene los microorganismos que metabolizan los compuestos, en general a esta técnica se le conoce como fitorremediación y puede clasificarse según el uso de la parte de la planta como se muestra en la tabla 22.(Arias Martínez et al., 2010)

Los humedales artificiales desarrollados para el tratamiento de aguas residuales pueden clasificarse en: los de flujo superficial (FWS – Free Water Surface) y los de flujo subsuperficial (SFS – Sub Surface Flow), en el primero el agua expuesta a la atmósfera circulando de manera lenta a través de tallos y raíces, el suelo es relativamente impermeable, vegetación superficial y

niveles de agua poco profundos que oscilan entre 0.1 y 0.6 metros, y el segundo consiste en un filtro biológico formado por ejemplo de piedra volcánica y grava en el cual se siembran las plantas macrófitas y las aguas residuales pretratadas atraviesan de forma horizontal o vertical el sistema, el nivel del agua se mantiene por debajo de la superficie de la capa granular.(Arias Martínez et al., 2010)

Tabla 2.
Procesos de fitorremediación.

<i>Tipo</i>	Proceso involucrado	Contaminación Tratada
<i>Fitoextracción</i>	Las plantas concentran los contaminantes en las partes cosechables (Partes aéreas)	Contaminación por cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercurio, plomo, selenio y zinc
<i>Rizofiltración</i>	Los contaminantes son absorbidos, concentrados y precipitados por las raíces. Los compuestos orgánicos son degradados.	Contaminación por cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercurio, plomo, selenio, zinc, isotopos radioactivos y compuestos fenólicos
<i>Fitoestabilización</i>	Las plantas tolerantes se usan para reducir su movilidad y evitar el pasaje a capas subterráneas o el aire.	Lagunas de desecho de yacimientos mineros, aguas residuales.

<i>Fitoestimulación</i>	Exudados radiculares se usan para promover el desarrollo de microorganismos degradativos. (Bacterias y hongos).	Hidrocarburos derivados del petróleo y poli aromáticos, benceno, tolueno, arazina, etc., aguas residuales agropecuarias
<i>Fitovolatilización</i>	Las plantas captan y modifican los contaminantes y posteriormente los liberan por medio de la transpiración a la atmosfera.	Aguas residuales agropecuarias, aguas con mercurio, selenio y solventes clorados.
<i>Fito degradación</i>	Las plantas acuáticas y terrestres captan, almacenan y degradan compuestos orgánicos para dar subproductos menos tóxicos o no tóxicos.	Aguas residuales agropecuarias. Municiones (TNT, DNT, RDX, nitrobenzeno, nitrotolueno), atrazina, solventes clorados, DDT, pesticidas fosfatados, fenoles y nitritos.

Fuente:(Arias Martínez et al., 2010)

De acuerdo a los experimentos realizados con relación al tratamiento de las aguas residuales de la industria porcícolas se identificaron tres tipos de plantas en la región antioqueña para ser utilizadas en los humedales artificiales.(Arias Martínez et al., 2010):

- Matandrea (Familia: *Zingyberaceae*, Género: *Hedychium*, Especie: *montana*)



Ilustración 6. Matandrea. Fuente: (Arias Martínez et al., 2010)

- Pasto pará (Familia: *Gramineae*, Género: *Brachiaria*, Especie: *mutica*)



Ilustración 7. Pasto pará. Fuente: (Arias Martínez et al., 2010)

- Pasto taner (Familia: *Gramineae*, Género: *Brachiaria*, Especie: *arrecta*)



Ilustración 8. Pasto taner. Fuente: (Arias Martínez et al., 2010)

La aplicación de los humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales de industrias porcícolas en donde se utilizan medios filtrantes y diferentes tipos de plantas se pueden lograr remociones de DBO5 y SST las cuales son congruentes al remover mínimo el 80 %. Las planta

seleccionadas en la región antioqueña indican que para este tipo de estrategias de humedales se debe buscar la vegetación nativa del lugar a realizar el proceso porque la capacidad de adaptabilidad es mayor que una planta foránea. (Arias Martínez et al., 2010).

En la ciudad de Bogotá se han realizado investigaciones en torno a la aplicación de humedales artificiales. Dentro de estas investigaciones por ejemplo se realizó un estudio de las características del agua residual proveniente de la planta de tratamiento de la Escuela Militar José María Córdova en comparación con la misma agua pero con tratamiento posterior a través del humedal, los resultados de dicha investigación permitieron observar la eficiencia en los parámetros de remoción a través del humedal artificial. (Torres & Marín, 2012)

Tabla 3.

Cuadro comparativo entre el agua de la planta de tratamiento de Escuela Militar José María Córdova y el agua tratada posteriormente a través del humedal artificial

PARÁMETROS	PTARD	HUMEDAL
PH	6.88	6,21
DQO	630 mg/L	205 mg/L
DBO5	240 mg/L	5 mg/L
SST	240 mg/L	3 mg/L
Grasas aceites	24 mg/L	0,3 mg/L
Sólidos sedimentables	0 mg/L	0 mg/L
Tensoactivos	0,2 mg/L	0 mg/L

Fuente: (Torres & Marín, 2012)

En cuanto a la operación y mantenimiento de los humedales artificiales es importante tener un control de las estructuras que lo conforman, limpieza de las estructuras de entrada y descarga, manejo de la vegetación y un monitoreo rutinario, en cuanto a la vegetación se debe cosechar cada 6 meses porque las plantas en crecimiento consumen más nitrógeno y fosforo. (Torres & Marín, 2012)

En la investigación realizada en la Escuela Militar José María Córdova se determinó que, a mayor temperatura, los procesos biológicos ocurren más rápido por tanto es suficiente con una pequeña extensión de área acompañado de Los Juncos, Papiros y heliconias como vegetación propia de humedales naturales, las cuales arrojaron excelentes resultados para ser empleadas en los residuales.(Torres & Marín, 2012)

En Colombia solo 235 municipios de 1092 tratan las aguas residuales domésticas, lo cual corresponde a un 21 % de tratamiento comparado con la cantidad de agua residual vertida que actualmente oscila entre 67 m³/s, a lo anterior se le suma que algunas plantas de tratamiento de aguas residuales operan con ineficiencias o no realizan procesos completos de depuración. La aplicación de humedales artificiales en diferentes regiones o municipios de Colombia permitiría reducir o mitigar características en la calidad actual del agua.(Diego Alonso Rivera Vergara*, 2015)

Los humedales artificiales son tecnologías limpias para el tratamiento de aguas residuales la cuales cuentan con características muy atractivas para su ejecución como lo es sencillo modo de operar, poca producción de lodos y bajo consumo energético.(Diego Alonso Rivera Vergara*, 2015)

4.3 Marco Conceptual

En los últimos años se le ha dado gran importancia a la innovación y creación de productos o servicios a partir de compuestos de origen natural, es precisamente esa búsqueda sistemática de compuestos químicos, genes y/o productos para uso comercial y académico a lo que se le conoce como bioprospección. En diferentes partes del mundo se están adelantando investigaciones en cuanto a la bioprospección aplicada al tratamiento de aguas residuales ya que los sistemas de tratamiento convencionales se han visto colapsados en parte por la infraestructura y el aumento del nivel de las aguas residuales conforme a las actividades de la población.(O. & V. Duarte Torres, 2009)

Las aguas residuales provienen de las actividades generadas por una población, es decir cuando el agua ha sido combinada con líquidos y residuos sólidos que provienen de residencias, oficinas, edificios comerciales e instituciones, junto con residuos de industrias, de actividades agrícolas, así como las aguas subterráneas, superficiales o de precipitación; en algunos lugares estas aguas residuales son distribuidas por una red de alcantarillado que en el mejor de los casos la conduce a una planta de tratamiento de aguas residuales. (Ortiz, 2014)

Tabla 4*Características de los contaminantes de las aguas residuales*

Contaminante	Característica
Sólidos suspendidos	Generan depósitos de lodo y condiciones anaerobias.
Materia orgánica biodegradable	Compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos y grasas. Por lo general, se mide en términos de DBO y DQO. Si es descargada sin tratamiento al medio ambiente, su estabilización biológica puede llevar al consumo de las fuentes de oxígeno natural y al desarrollo de condiciones sépticas.
Microorganismos patógenos	Transmisión de enfermedades Pueden llevar al crecimiento de vida acuática indeseable. Cuando son aplicados al suelo en
Nutrientes	cantidades excesivas, pueden contaminar también el agua subterránea
Compuestos tóxicos	Compuestos orgánicos e inorgánicos seleccionados en función de sus conocimientos o sospecha de

carcinogenicidad, mutuanogenicidad,
teratogenicidad, o elevada toxicidad.

Materia orgánica

Detergentes, fenóles y pesticidas agrícolas.

refractaria

Metales pesados

Sustancias con alta capacidad de acumulación y
toxicidad.

Sólidos

inorgánicos

Calcio, sodio y sulfato,

disueltos

Fuente : (Ortiz, 2014)

4.3.1 Biotratamientos aplicados a las aguas residuales

Los tratamientos biológicos de aguas residuales consisten en el empleo de microorganismos, por ejemplo, bacterias, hongos, algas y plantas para el tratamiento de las mismas. Esta tecnología limpia tiene rendimientos con menores costos económicos de explotación y mantenimiento, y destruyen completamente los contaminantes, transformándolos en sustancias inocuas como el dióxido de carbono, el metano, el nitrógeno molecular y el agua. Estos tratamientos pueden verse limitados por los afluentes contaminados con moléculas xenobióticos, inhibitorias, o tóxicas.(Tecnología & De, 2000)

Los tratamientos biológicos pueden clasificarse en tratamientos anaerobios y tratamientos aerobios.

- Tratamientos anaerobios: Proceso desarrollado en ausencia de oxígeno.
- Tratamientos aerobios: Proceso desarrollado en presencia de oxígeno.

4.3.2 Bacterias

Las Bacterias son un grupo de organismos microscópicos unicelulares que cuentan con diversas formas, habitan cualquier tipo de ambiente suelo, aire, agua e incluso habitan en los seres vivos, su reproducción la realizan a través de “Schizomycetes”, lo cual es un proceso de división sencilla mediante el cual se multiplican. Según las investigaciones de las 1500 especies de bacterias solo se ha descubierto que 250 que llegarían a producir enfermedades, por lo general las bacterias desempeñan una serie de procesos de tratamiento que incluyen oxidación biológica, fermentaciones, digestión, nitrificación y des nitrificación. La Biodegradación o degradación de la materia orgánica es realizada por acción de microorganismos sobre el suelo, aire, cuerpos de agua receptores o procesos de tratamiento de aguas residuales.(Mézquita, 1995)

La actividad bacteriana se ha convertido una necesidad para la humanidad, por ejemplo, en las últimas décadas se ha utilizado para la producción de alimentos y medicinas.(Mézquita, 1995)

4.3.3 Algas

Las algas son organismos fotosintéticos que han cobrado gran importancia en los últimos años sobre todo en ecosistemas trópicos para el tratamiento biológico de las aguas residuales, las algas han sido utilizadas principalmente en procesos de tratamiento terciario para remover nutrientes como el fosforo y nitrógeno, según los estudios las algas cuentan con gran habilidad para remoción de estas sustancias las cuales le ayudan a crecer. La actividad fundamental de las algas

es generar oxígeno a través del proceso fotosintético la ausencia de estas en los procesos convertiría el sistema en anaerobio y las bacterias no podrían utilizar el oxígeno para la oxidación de la materia orgánica.(Escorihuela, Núñez, Rosales, & Morales, 2007)

4.3.4 Hongos

Los hongos son organismos que tienen células con núcleo es decir son eucariontes y requieren de otros seres vivos para obtener su alimento, tienen una gran capacidad para transformar compuestos orgánicos en CO_2 Y H_2O , lo cual los ha convertido en una técnica de tratamiento para las aguas residuales. Su potencial se basa su sistema enzimático y en su exponencial crecimiento que les permite, a través su micelio, colonizar diferentes tipos de sustratos y acceder a los compuestos que constituyen las contaminaciones más frecuentes de las aguas residuales.

Los metales pesados son un componente frecuente de las aguas residuales pero los hongos tienen la capacidad para acumular metales pesados como cadmio, cobre, mercurio, plomo y zinc.(Moreno, González, & Santos, 2004)

Se han realizado investigaciones donde se ha descubierto que los hongos pueden habitar ambientes con altas concentraciones de minerales y pH bajos como por ejemplo el río Tinto en España.(Moreno et al., 2004)

4.3.5 Plantas

En los sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales las plantas realizan procesos fundamentales como la transferencia de oxígeno a la zona de la raíz. Su estructura física en el

sistema de tratamiento es decir tallos, raíces y rizomas permite su desarrollo en el agua o medio de apoyo y transporta el oxígeno de manera más profunda y homogénea por todo el sistema comparado con lo que llegaría naturalmente a través de la sola difusión. En sistemas donde se utilizan plantas como es el caso de los humedales artificiales las hojas y tallos muertos son aprovechados como substrato para el crecimiento bacteriano. (Ortiz, 2014)

Tabla 5

Beneficios de las plantas en el tratamiento de las aguas residuales

Beneficios de las plantas en el tratamiento de las aguas residuales

Estabilizan el substrato y limitan la canalización del flujo.

Controlan la velocidad y permiten el decantamiento de sustancias

Metabolizan el carbono y nutrientes

Transfieren gases entre la atmosfera y los sedimentos

El tallo y raíz permite el cultivo de microorganismos

Fuente:(Ortiz, 2014)

4.4 Marco Legal

En el ámbito legal, donde se regula la práctica de la bioprospección, existen algunas dificultades para su implementación. Internacionalmente, existe el *Convenio de Diversidad Biológica (CDB)*, como marco que regula dicha práctica, el cual reconoce el derecho soberano de los países sobre el control de la biodiversidad, limita el acceso abierto a los recursos genéticos y, por tanto, establece que estos recursos no son patrimonio de la humanidad, de manera abierta y libre. (O. Duarte Torres, 2011a). Debido al hecho que el Convenio de Diversidad Biológica relaciona la conservación de los recursos genéticos con la posibilidad de uso comercial, a través de una extensión de la propiedad intelectual de los productos biotecnológicos, éste ha sido objeto de muchas críticas desde la promulgación. (Consejo Nacional de Política Económica y Social et al., 2011)

Como resultado de estas críticas, algunos países han decretado leyes supranacionales que buscan especificidad regional; por lo anterior en 1996, los cinco países andinos Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela firmaron la Decisión Andina 391, de la Junta del Acuerdo de Cartagena, la cual establece un aspecto de gran relevancia en relación con las características importantes de los recursos genéticos: *son inalienables, son imprescriptibles y son inembargables*. Por lo tanto, los recursos genéticos de la biodiversidad sólo se pueden dar en usufructo a través de contratos de acceso, pero no se pueden vender o donar. (O. Duarte Torres, 2011a)

El acceso a estos contratos requiere, previamente, un proceso para solicitar y obtener permisos para la exploración de los recursos genéticos ante la autoridad nacional competente, en este caso es el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT).(O. Duarte Torres, 2011a)

En 1992, el Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB) fue ratificado por Colombia mediante la incorporación de la Ley 165, de 1994 a la legislación nacional, desde entonces, la bioprospección se define como la búsqueda sistemática, clasificación e investigación de nuevas fuentes de compuestos químicos, genes, proteínas y otros productos a partir de la exploración de la diversidad biológica y que tienen un valor económico potencial. De acuerdo con los artículos 3 y 15 de la presente Convención, el acceso a los recursos biológicos se considera de la soberanía de cada Estado, y ya no es la herencia de la humanidad. Por lo tanto, la bioprospección se ha convertido en el camino para aprovechar la diversidad biológica, en particular en los países en desarrollo, incluso a través de medidas de investigación con propósitos no comerciales, teniendo en cuenta la necesidad de hacer frente a un cambio de intención para dicha investigación; "En consonancia con la Decisión 391 de 1996 de la Andina Comunidad de Naciones, el Estado colombiano la investigación científica regulado en la biodiversidad y el acceso a los recursos genéticos a través del Decreto 309 de 2000, que fue modificado por el Decreto 302 de 2003, haciendo una distinción entre los dos procedimientos. De acuerdo con ello, el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) crearon formularios especiales para solicitar el permiso para la investigación científica en la biodiversidad y el acceso a los recursos genéticos.(G??iza & Bernal, 2013).

Bajo esta nueva regulación, la Resolución 068 de 2002 regula específicamente los procedimientos relativos "*Estudio de los permisos para la investigación científica en biológica*

la diversidad ", y el Decreto 309 y la Resolución 620 de 1997, que se han aplicado de acuerdo con el Decreto mencionado, han regulado el acceso a los recursos genéticos. El artículo 2 del Decreto 309 menciona los recursos biológicos como referencia para la investigación de la biodiversidad, por lo que es importante establecer que el término "recursos biológicos" se refiere a los individuos, organismos o partes de ellos, poblaciones o cualquier componente biótico de valor; o el uso real o potencial en el recurso genético o sus derivados. Por otra parte, el término "recursos genéticos" ha sido asociado a todo el material biológico que contiene la información genética de valor o de uso potencial, y, en consecuencia, se ha aplicado en estudios moleculares.(G??iza & Bernal, 2013).

En Colombia la normatividad aplicada a las aguas residuales comenzó su regulación con la expedición del Decreto 1594, con el cual se ha controlado la contaminación hídrica en el país de la mano con la implementación de las tasas retributivas.(CONPES Consejo Nacional de Política Económica y Social, 2008)

El decreto 1594 controla los usos del agua y el control de vertimientos estableciendo los límites permisibles en cuestiones sanitarias y parámetros fisicoquímicos, adicionalmente ordena al dueño de la actividad que está generando la contaminación realizar la remoción de un porcentaje definido de materia orgánica y solidos suspendidos. Lo anterior permitió identificar ciertas falencias en la forma de control, por lo que esta situación dio origen a la Resolución 631 de 2015 por el cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones, cuya intención es reducir y controlar las sustancias contaminantes que llegan a los ríos, embalses, lagunas, cuerpos de agua naturales o artificiales de agua dulce, y al sistema de alcantarillado público, favoreciendo de esta forma la calidad del agua

y sobre todo dando vía para trabajar en proyectos de recuperación hídrica en todo el territorio nacional.(Minambiente, 2015)

Entre los aspectos a resaltar de la actualización de la norma es importante mencionar:

- Porcentajes máximos permitidos de vertimientos por actividad productiva
- Límites máximos permitidos por actividad económica.
- Clasificación de las Aguas Residuales Domésticas (ARD) de las Aguas Residuales no Domésticas (ARND).

Aproximadamente el 80% de las aguas residuales en el mundo no son tratadas ni reutilizadas, en Colombia se expidió la norma de vertimientos a cuerpos de aguas superficiales y al alcantarillado público, y la norma de reúso de aguas residuales tratadas con el fin de contribuir en la conservación del recurso hídrico. (CONPES Consejo Nacional de Política Económica y Social, 2008)

La gestión del recurso hídrico se ha favorecido con la expedición del CONPES de la Estrella hídrica del Macizo colombiano, donde nacen 5 ríos: Magdalena, Cauca, Patía, Putumayo y Caquetá. Ese documento define las estrategias para la conservación y desarrollo sostenible de esta zona, la promoción de alternativas productivas sostenibles y el fortalecimiento de la gobernanza de la ecorregión.(CONPES Consejo Nacional de Política Económica y Social, 2008)

De acuerdo a lo anterior y a las actividades productivas de Colombia se enfatiza cada vez más en la conservación y recuperación del recurso hídrico, los controles establecidos de manera correcta facilitan la implementación de proyectos bioprospectivos los cuales resultan ser económicos y no afectan el medio ambiente.(CONPES Consejo Nacional de Política Económica y Social, 2008)

5. Análisis De Resultados.

Como resultado de las investigaciones descritas en el presente documento, se establece la importancia que puede llegar a tener la bioprospección en el tratamiento de las aguas residuales en diversos países del mundo y en especial Colombia. Países como Estados Unidos ha apropiado cada vez más procesos con base en la bioprospección, aplicándolos en los Biotratamientos de aguas residuales. Ya en el contexto europeo, algunas prácticas bioprospectivas son nuevas, pero las han implementado poco a poco según la necesidad.(Ortiz, 2014). En Colombia se puede encontrar diferentes habitas para realizar investigaciones y además se encuentra el personal idóneo para realizar dicha tarea, pero muchas investigaciones realizadas se quedan en el papel por falta de vía de acceso para lograr acuerdos comerciales, lo anterior fundamentado en la falta de claridad en cuanto a normatividad para la bioprospección en Colombia.

Diferentes industrias y empresas están cada vez más interesadas en descubrir aplicaciones o servicios derivados de los microorganismos ya que sus modelos tradicionales principalmente no conservan los recursos o materia prima y finalmente no cumplen las exigencias sobre el cuidado del ambiente.(Consejo Nacional de Política Económica y Social et al., 2011).

En investigaciones realizadas en el extranjero se observa que diferentes empresas de otros países han logrado realizar investigaciones bioprospectivas sobre los recursos hallados en territorio Colombiano y sin lugar a duda la investigación resulta un éxito es decir no se evidencia inconvenientes desde que inicia la exploración del recurso hasta que logran un usufructo económico o académico del mismo muy al contrario en Colombia cuando hay iniciativas de investigación científica y hay descubrimientos de nuevos compuestos o masas, el desarrollo de estos proyectos se ve empañados porque lamentablemente Colombia no cuenta con

laboratorios especializados y la opción es hacerlos llegar a un país extranjero para dichas pruebas lo que resulta muy costoso comparado a lo que se obtendría si Colombia contara con el desarrollo de laboratorios y tecnología. Complementando a lo anterior los investigadores presentan inconvenientes para exportar su material de estudio ya que el INVIMA exige una ficha técnica del producto lo cual es inconsistente ya que para ello es que se necesita exportarlo para obtener características del producto.

Dentro de los recursos ambientales más impactados por temas de contaminación se encuentra el hídrico, el cual, día a día muestra cada vez más su deterioro. Se observan fácilmente como disminuye, de forma constante, el porcentaje de disponibilidad de agua potable para la población y también su disponibilidad para uso agrícola e industrial. Lo anterior hace parte de un problema de salud pública que afecta económica y socialmente al país. (QUISPE MACHACA, 2017).

Actualmente en Colombia se está trabajando para dar claridad cada vez más a la política del uso y aprovechamiento del agua, en compañía de investigadores desde la academia se realizan propuestas de biotratamientos para el agua residual, pero es fundamental buscar financiamientos en lo posible nacionales para que dicha propuesta pueda ser desarrollada en el territorio colombiano generando beneficios académicos y económicos y aumentando la capacidad endógena del país.

La generación de agua residual es proporcional al crecimiento demográfico, factores como el anterior y sumado a la falta de tecnología limpia en la industria, arroja resultados deplorables en cuanto al porcentaje de tratamiento de aguas residuales. Por ejemplo, Colombia solo trata el 21 % de sus aguas residuales sin mencionar las fallas técnicas que pueden llegar a tener algunas plantas. (Ortiz, 2014)

Dentro de las características de las aguas residuales está la concentración de metales pesados los cuales no pueden degradarse biológicamente ni químicamente en la naturaleza, básicamente el hombre ni los crea ni los destruye, estos elementos han sido muy contaminantes pero esta situación no se debe al elemento como tal, sino a su elevada concentración que lo hace tóxico.(QUISPE MACHACA, 2017)

La industria agrícola, metalúrgica, las curtiembres, las empresas de pintura y los drenajes de mina aportan diariamente concentraciones considerables de metales pesados a las aguas naturales. Como los metales pesados pueden ser bioacumulados en tejidos vegetales y animales, es muy importante poder conocer y controlar de los niveles de concentración para que no se afecten las cadenas tróficas.(QUISPE MACHACA, 2017)

De los metales pesados cuyas altas concentraciones son preocupantes, se destacan el mercurio (Hg) y el plomo (Pb). En países como Colombia donde una de las principales actividades económicas es la minería observamos consecuencias negativas en el ambiente y en la población. Para lograr controlar esta problemática se han adelantado investigaciones donde las bacterias demuestran tolerar los efectos nocivos de los metales tóxicos a través de componentes celulares que capturan a los iones, neutralizan su toxicidad, utilizan enzimas que modifican el estado redox de los metales o metaloides y los convierten en formas menos tóxicas; adicionalmente, se ha experimentado con consorcios bacterianos en los que participan cepas como: *Viridibacillus arenosi*, *Sporosarcina soli*, *Enterobacter cloacae* y *E. cloacae* entre otras arrojando muy buenos resultados en la biorremediación del afluente. Estudios recientes han demostrado que la bacteria del género *Serratia* es muy resistente al plomo y al mercurio.(QUISPE MACHACA, 2017)

Las investigaciones han reportado el uso de algas como *Lepocinclis* sp. y *Klebsormidium* sp para la biorremediación de metales pesados en el agua residual y al igual que las bacterias descritas en párrafo anterior, las algas cuentan con una buena capacidad de crecimiento y distribución en el afluyente contaminado.(Bwapwa et al., 2017)

Industrias como la de la curtiembre aportan grandes concentraciones de cromo a los afluentes, a pesar de que existe una legislación para controlar estos vertidos, en varios municipios y/o ciudades encontramos altas concentraciones no solo de cromo, si no también cadmio, plomo y mercurio. Estudios han demostrado que hongos como *P. chrysosporium* son hipertolerante a concentraciones de metales pesados. Además, pueden trabajar muy bien en conjunto con las algas y representan una alternativa económicamente viable para el tratamiento de las aguas residuales.(Gómez-Bertel et al., 2008)

En las aguas residuales en especial las generadas en zonas como Santa Marta, Barranquilla, Cartagena, los Golfos de Morrosquillo y Urabá en Colombia están contaminadas por compuestos orgánicos como los hidrocarburos las cuales son sustancias conformadas principalmente por compuestos con diferente solubilidad, volatilidad, y formadas únicamente por átomos de carbono e hidrógeno lo cual permite llevar a cabo procesos de biodegradación. Dentro de estos procesos de biodegradación se encuentra la acción de las bacterias sulfato-reductoras las cuales utilizan el fosfogeso (sulfato cálcico hidratado) como sustrato para realizar una purificación de hasta el 90% del agua contaminada por hidrocarburos.(Wolicka, 2008)

La contaminación del agua por hidrocarburos se presenta de forma consentida por vertimientos de industrias, pero a veces de forma accidental como es al caso de los derrames que han afectado principalmente zonas como la alta llanura araucana, la cuenca del río Catatumbo, la llanura del valle medio y medio bajo del río Magdalena; departamentos de Santander, Cesar, Sucre, y

departamentos como Putumayo y Nariño. Tomando en cuenta el impacto que el vertimiento de hidrocarburos hace en el ambiente, la fitorremediación sobresale como una muy buena alternativa de remediación ya que a través de la capacidad restauradora de las plantas, se logra degradar, asimilar, metabolizar o detoxificar contaminantes.(Velásquez Arias, 2017)

Países como Estados Unidos es ejemplo de inversión en recursos económicos para investigación respecto al uso de las plantas en biorremediación logrando de esta manera pasar de proyectos piloto a proyectos ya en ejecución en municipios y ciudades como Phoenix, Arizona, y el Condado de Orange, Florida. (Ortiz, 2014).En Colombia por su parte se están ejecutando proyectos piloto en diferentes departamentos del país como es el caso de Antioquia, la zona cafetera, Guainía y Bogotá, el resultado de estos proyectos ha sido óptimo las principales plantas protagonistas de varios procesos han sido: *Typha ssp*, *el Phagmites comunes*, *el Juncos ssp*, *el Schoenoplectus*, *el Carex*, *El papiro*, *Lirio*, *Carrizo* y *Nenúfar*.(Salazar et al., 2013)

Colombia con su gran biodiversidad hace potenciales algunos municipios para colocar en ejecución proyectos como humedales artificiales, en regiones como la amazonia, la Orinoquía, el pacífico y algunos departamentos de la zona del caribe donde la población varía aproximadamente de 42.777 a 1´ 787.715 habitantes, pueden realizarse proyectos pilotos y consolidarlos para llevarlos a zonas con poblaciones más grandes por ejemplo como Bogotá que cuenta con 8´ 080.734 habitantes.(DANE Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas, 2009)

En municipios cuyo clima es cálido, se facilita la velocidad de degradación de los procesos biológicos, en los humedales artificiales generalmente para la puesta en marcha de este tipo de proyectos se verifica la vegetación nativa en el lugar, ya que esta cuenta con mejor adaptabilidad al medio sin alterar el ecosistema. En Colombia solo 235 municipios del país tratan las aguas

residuales y muchos de estos municipios cuentan con problemas para la operación de dichas plantas de tratamiento. La estrategia de humedales artificiales es una técnica económica, estética y operativamente viable para gran parte de los municipios de Colombia y se presenta como una puerta para la incorporación de hábitats de vida silvestre y recreación pública.(Ortiz, 2014)

6. Conclusiones

- Tras el desarrollo del ejercicio académico que dio como resultado la presente monografía, se evidenciaron diversos estudios en donde se aplican metodologías prospectivas en búsqueda de estrategias ambientalmente amigables, para el tratamiento de aguas residuales, que envuelven el uso de organismos como bacterias, hongos, algas y plantas.
- Se puede concluir que en la medida que surgen los avances tecnológicos, los resultados de investigaciones en bioprospección llegan a tener aplicaciones que pueden mejorar procesos como el tratamiento de aguas residuales, en donde a partir de la aplicación de tratamientos biológicos, se puede considerar disminuir la carga de contaminantes como los derivados del petróleo, metales pesados y pesticidas.
- Las modificaciones a la norma de vertimiento puntuales en donde se destaca la regulación del contaminante no por su cantidad si no por concentración, permite establecer modelos bioprospectivos con algas, planta hongos y bacterias de forma más efectiva, facilitando la construcción y mantenimiento de estos sistemas limpios en las industrias.
- Con las nuevas disposiciones legales varias empresas están en la obligación de realizar un tratamiento previo a sus aguas residuales, con el avance de las investigaciones bioprospectivas hoy en día se encuentran en el mercado productos hechos de bacterias que abarcan una amplia capacidad de degradación orgánica dirigidas a una variedad de residuos industriales. La mezcla incorpora cepas microbianas capaces de degradar los ácidos grasos, agentes tensoactivos, hidrocarburos, compuestos fenólicos, cetonas y compuestos orgánicos recalcitrantes.
- A pesar de la baja inversión en investigación en Colombia y que el marco legal no favorece el estudio de la diversidad de una manera adecuada, la bibliografía consultada evidencia

que Colombia representa un escenario óptimo para este tipo de investigaciones debido a su riqueza en recursos biológicos y genéticos.

- La bioprospección se reconoce como una estrategia de interés mundial, su desarrollo no solo se ha basado en el descubrimiento de nuevas fuentes de compuestos si no también en la modificación estructural de los ya existentes. Por lo anterior cobra importancia la 78 conservación y apropiación de los recursos genéticos por parte de Estado colombiano, permitiendo beneficiar a la comunidad de los acuerdos académicos y comerciales en torno a procesos bioprospectivos.
- La instalación de los humedales artificiales podría empezarse a ejecutar en poblaciones pequeñas de Colombia y en donde no existe un tratamiento de agua residual fuera del pozo séptico, su construcción y mantenimiento es económico y no se requiere el uso de elementos químicos ni energía eléctrica o combustibles fósiles para su operación. Las investigaciones demuestran una depuración de un gran porcentaje del contenido orgánico, de patógenos microbiológicos y algunos otros compuestos contaminantes de las aguas como fosfatos, nitratos, grasas, aceites e incluso metales pesados.
- De acuerdo con la similitud en concentración demográfica y características geográficas, pueden adoptarse proyectos pilotos en Colombia, que en países como por ejemplo Estados Unidos están siendo ejecutados en sus municipios con óptimos resultados.

7. Recomendaciones

- La gran biodiversidad que tiene Colombia en cuanto a bacterias, algas, hongos y plantas debe ser investigada con fines de remediar los niveles de contaminación por aguas residuales, precisamente como estos cuerpos de agua contaminados se han convertido en una problemática ambiental y de salud pública, la política ambiental del gobierno debe ser más generosa y amplía a temas investigativos que permitan a las comunidades académicas y/o empresariales si es el caso, avanzar en bioprospección aplicada a las aguas residuales. A lo largo y ancho del país contamos con múltiples escenarios potenciales donde se pueden implementar proyectos pilotos, pero el gobierno y sus entidades encargadas deben promover la capacitación y el acompañamiento para que estos proyectos puedan ser ejecutados en municipios donde hoy en día las aguas residuales se vierten en pozos abiertos y lo más importante brindar el acompañamiento para que el proyecto se siga ejecutando y sea uno de los atractivos para comentar entorno a la gestión ambiental del país.
- Autoridades como el Ministerio de Ambiente y sus extensiones en los departamentos deben promover el avance en la investigación bioprospectiva para la remediación de aguas residuales sin olvidarse de regular los intereses comerciales que pueden suscitar.

8. Referencias

- Arias, C. (2003). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Ciencia E Ingeniería Neogranadina*, 13. Retrieved from <https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rcin/article/view/1321/1051>
- Arias Martínez, S. A., Betancur Toro, F. M., Gómez Rojas, G., Salazar Giraldo, J. P., & Hernández Ángel, M. L. (2010). Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas. *Informador Técnico (Colombia)*, 74, 12–22.
- Arnáiz, C., Isac, L., & Lebrato, J. M. (2000). Tratamiento biológico de aguas residuales. *Tecnología Del Agua*, 198, 20.
- Bwapwa, J. K., Jaiyeola, A. T., & Chetty, R. (2017). Bioremediation of acid mine drainage using algae strains: A review. *South African Journal of Chemical Engineering*, 24(June), 62–70. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2017.06.005>
- Cerón, a, Leal, M., & Nassar, F. (2009). ¿ Hay futuro para la economía colombiana en la biodiversidad? *Revista EAN*, (62), 107–124. Retrieved from <http://journal.ean.edu.co/index.php/Revista/article/viewArticle/19>
- Cervantes, F., Pérez, J., & Gómez, J. (2000). Avances en la eliminación biológica del nitrógeno de las aguas residuales. *Revista Latinoamericana de Microbiología*, 42(2), 73–82.
- CONPES Consejo Nacional de Política Económica y Social. (2008). Conpes 3550 de 2008, 53. Retrieved from http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/conpes/2008/Conpes_3550_2008.pdf
- Consejo Nacional de Política Económica y Social, República de Colombia, & Departamento

Nacional de Planeación. (2011). Documento Conpes 3697. *Bogotá D.C., 14 de Junio.*

[https://doi.org/documento Conpes No:3697.](https://doi.org/documento%20Conpes%20No:3697)

CORPOICA. (2012). *BIOPROSPECCIÓN PARA EL DESARROLLO DEL SECTOR*

AGROPECUARIO DE COLOMBIA. Retrieved from

https://www.researchgate.net/publication/287215006_BIOPROSPECCION_PARA_EL_DESARROLLO_DEL_SECTOR_AGROPECUARIO_DE_COLOMBIA

DANE Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas. (2009). *Proyecciones nacionales y departamentales de población 2005-2020. ESTUDIOS POSTCENSALES No. 7 ISBN 978-958-624-078-9 BOGOTÁ - COLOMBIA - 2009.*

<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Díaz-Cárdenas, C., & Baena, S. (2015). Manantiales salinos: Inventarios de Diversidad Metabólica y filogenética de microorganismos de ambientes salinos. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales*, 39(152), 358.

<https://doi.org/10.18257/raccefyn.199>

Diego Alonso Rivera Vergara*. (2015). Humedales de flujo subsuperficial como biofiltros de aguas residuales en Colombia. *Cuaderno Activa*, 7, 99–107. Retrieved from

<http://ojs.tdea.edu.co/index.php/cuadernoactiva/article/view/265/269>

Duarte Torres, O. (2011a). La bioprospección en Colombia.

Duarte Torres, O. (2011b). La bioprospección en Colombia. *EXPEDITIO*, 7. Retrieved from

<https://revistas.utadeo.edu.co/index.php/EXP/article/view/732/740>

Duarte Torres, O. & V. (2009). Capacidades científicas y tecnológicas de Colombia para

adelantar prácticas de bioprospección. *Revista Iberoamericana de Ciencia Tecnología Y Sociedad*, 4. Retrieved from http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1850-00132009000100004&script=sci_arttext&tlng=en

Escorihuela, a, Núñez, M., Rosales, N., & Morales, R. M. E. (2007). Microalgas presentes en una laguna para pulimento de efluentes de una planta de tratamiento de aguas residuales urbanas Presence of microalgae in a lagoon for polishing of effluents from a treatment plant for urban wastewaters Resumen Introducción. *Population (English Edition)*, 225–230.

G??iza, L., & Bernal, D. (2013). Bioprospecting in Colombia. *Universitas Scientiarum*, 18(2), 153–164. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.SC18-2.bc>

Gómez-Bertel, S., Amaya-Bulla, D., Maldonado-Saavedra, C., Martínez-Salgado, M. M., Quevedo-Hidalgo, B., Soto-Guzmán, A. B., & Pedroza-Rodríguez, A. M. (2008). Evaluación de tres hongos lignolíticos y de *Aspergillus niger* como alternativa para el tratamiento de aguas residuales del curtido de pieles. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 24(3), 93–106.

Gómez, J. D. V., Erazo, J. G., Rajas, J. M. C., & Cuervo, D. P. (2006). Variaciones al sistema Tanque Séptico (TS)-Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente (FAFA)-Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial (HAFSS) con miras al tratamiento de aguas residuales en pequeños municipios de Colombia. *Revista Tecnica de La Facultad de Ingenieria Universidad Del Zulia*, 29(3), 269–281.

Gómez, M., Vivas, L., Ruiz, R., Reyes, V., & Hurtado, C. (2006). *019-Bacterias marinas nativas: degradadoras de compuestos orgánicos persistentes en Colombia*.

Gonzalez, C., Marciniak, J., Villaverde, S., García-Encina, P. A., & Muñoz, R. (2008).

- Microalgae-based processes for the biodegradation of pretreated piggery wastewaters. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 80(5), 891–898. <https://doi.org/10.1007/s00253-008-1571-6>
- Helbling, D. E. (2015). Bioremediation of pesticide-contaminated water resources: The challenge of low concentrations. *Current Opinion in Biotechnology*, 33, 142–148. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2015.02.012>
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos, & Humboldt, A. von. (2015). *Estado y tendencias de la biodiversidad continental de Colombia*. Retrieved from http://reporte.humboldt.org.co/biodiversidad/descargas/2015/IAVH_Biodiversidad_2015_WEB.pdf
- Kang, C.-H., Kwon, Y.-J., & So, J.-S. (2016). Bioremediation of heavy metals by using bacterial mixtures. *Ecological Engineering*, 89, 64–69. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.01.023>
- Melgarejo, L. M., Sánchez, J., Reyes, C., Newmark, F., & Santos-Acevedo, M. (2002). *Plan nacional en bioprospección continental y marina (propuesta técnica)*.
- METCALF & EDDY, I. (1998). *Ingeniería de aguas residuales*. Madrid.
- Mézquita, A. (1995). Tratamiento Biológico de aguas residuales a base de enzimas y bacterias, 5, 1–12.
- Minambiente. (2015). Resolución 0631.
- Moeller, G., & Tomasini, A. (2010). Microbiología de lodos activados. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 148–208. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Mohite, P. T., Kumar, A. R., & Zinjarde, S. S. (2016). Biotransformation of hexavalent

chromium into extracellular chromium(III) oxide nanoparticles using *Schwanniomyces occidentalis*. *Biotechnology Letters*, 38(3), 441–446. <https://doi.org/10.1007/s10529-015-2009-8>

Moreno, C. M., González, A., & Santos, B. (2004). Tratamientos biológicos de suelos contaminados : contaminación por hidrocarburos . Aplicaciones de hongos en tratamientos de biorrecuperación. *Rev Iberoam Micol*, 21, 103–120.

Orozco, A. (2005). *Bioingeniería de Aguas Residuales*. (Acodal, Ed.).

Ortiz, C. E. E. (2014). Factibilidad del diseño de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales municipales de 30.000 habitantes. *Escuela Colombiana de Ingeniería*, 1–81.

Pnuma. (2009). Guía de bolsillo sobre acceso y participación en los beneficios - Bioprospección, 64. Retrieved from http://www.unep.org/DEC/PDF/UNU_IAS_Pocket_Guide_SPANISH.pdf

QUISPE MACHACA, E. D. (2017). *RESISTENCIA IN VITRO AL PLOMO Y MERCURIO POR LA COMUNIDAD BACTERIANA DE LAS AGUAS DEL RÍO RAMIS – PUNO, PERÚ*.

Romeo Casabona, C. M. (2017). bioprospección (Jurídico). In *ENCICLOPEDIA de BIODERECHO y BIOÉTICA*. Retrieved from <http://enciclopedia-bioderecho.com/voces/47>

Salazar, P., Chinchilla, A., Marín, S., & Pérez, A. (2013). PERFORMANCE EVALUATION OF AN ALTERNATIVE ARTIFICIAL WETLANDS SYSTEM USED AS WASTEWATER TREATMENT Roy Pérez Salazar Carolina Alfaro Chinchilla Jihad Sasa Marín Juan Agüero Pérez Laboratorio de Gestión de Desechos , Escuela de Química Universidad Nacional .

- Seoanez Calvo, M. (1995). *AGUAS RESIDUALES URBANAS Tratamientos naturales de bajo costo y aprovechamiento*. España.
- Sode, S., Bruhn, A., Balsby, T. J. S., Larsen, M. M., Gotfredsen, A., & Rasmussen, M. B. (2013). Bioremediation of reject water from anaerobically digested waste water sludge with macroalgae (*Ulva lactuca*, Chlorophyta). *Bioresource Technology*, *146*, 426–435. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.06.062>
- Tecnología, R., & De, M. (2000). Tratamiento biológico de aguas residuales.
- Torres, E., & Marín, A. (2012). Optimización del humedal artificial subsuperficial para tratamiento de Aguas Residuales. *Ingenio Libre*, 29–38.
- Velásquez Arias, J. A. (2017). Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación. *Revista de Investigación Agraria Y Ambiental*, 8.
- Wolicka, D. (2008). Biotransformation of phosphogypsum in wastewaters from the dairy industry. *Bioresource Technology*, *99*(13), 5666–5672. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.10.029>
- Xu, Y., Yuan, Z., & Ni, B. J. (2016). Biotransformation of pharmaceuticals by ammonia oxidizing bacteria in wastewater treatment processes. *Science of the Total Environment*, 566–567(November), 796–805. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.118>