UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA VIDA

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

DENOMINACIÓN DEL TÍTULO A OBTENER

INGENIERO AMBIENTAL

TÍTULO DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

ANÁLISIS DE ESPECIES VEGETALES AMAZÓNICAS PARA REMOCIÓN DE METALES PESADOS (CU, CR, PB, NI), EN AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES MEDIANTE FITO-RREMEDIACIÓN, APLICANDO ANÁLISIS ENVOLVENTE DE DATOS.

AUTORES

COLLAGUAZO CEVALLOS MARLON FABRICIO

PIURI GUZMAN BRYAN ARTURO

DIRECTOR DEL PROYECTO

MSc. JORGE BONILLA

PUYO-ECUADOR

2020

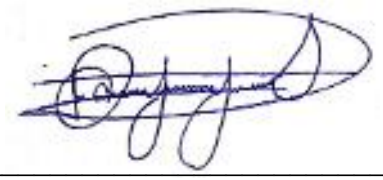
DECLARATORIA DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Nosotros, Collaguazo Cevallos Marlon Fabricio y Piuri Guzmán Bryan Arturo con C.I. 1718432048 y 2100543509, hace constar que son autores/a del Proyecto de Investigación/Trabajo de Integración Curricular titulado: ANÁLISIS DE ESPECIES VEGETALES AMAZÓNICAS PARA REMOCIÓN DE METALES PESADOS (Cu, Cr, Pb, Ni), EN AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES MEDIANTE FITO-RREMEDIACIÓN, APLICANDO ANÁLISIS ENVOLVENTE DE DATOS, el cual constituye una elaboración personal realizada únicamente con la dirección del Tutor de dicho trabajo, Msc. Bonilla Chango Mario Jorge con CI. 1600348625. En tal sentido, manifiesto la originalidad de la conceptualización del trabajo como interpretación de datos y elaboración de conclusiones dejando establecido que aquellos aportes intelectuales de otros autores se han referenciado debidamente en el texto de dicho trabajo.

En el cantón Pastaza, a los 03 días del mes de septiembre del 2020.



Estudiante
Marlon Fabricio Collaguazo Cevallos
CI: 1718432048



Estudiante
Bryan Arturo Piuri Guzmán
CI: 2100543509

CERTIFICADO DE APROBACIÓN POR EL TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

El tribunal de sustentación del proyecto de investigación y desarrollo aprueba el proyecto de Investigación/Trabajo de Integración Curricular titulado: **ANÁLISIS DE ESPECIES VEGETALES AMAZÓNICAS PARA REMOCIÓN DE METALES PESADOS (Cu, Cr, Pb, Ni), EN AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES MEDIANTE FITO-RREMEDIACIÓN, APLICANDO ANÁLISIS ENVOLVENTE DE DATOS.**

Mercedes Asanza M.

Dr/Msc Mercedes Asanza

Presidente del tribunal

CERTIFICADO DE APROBACIÓN POR EL TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

El tribunal de sustentación del proyecto de investigación y desarrollo aprueba el proyecto de Investigación/Trabajo de Integración Curricular titulado: **ANÁLISIS DE ESPECIES VEGETALES AMAZÓNICAS PARA REMOCIÓN DE METALES PESADOS (Cu, Cr, Pb, Ni), EN AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES MEDIANTE FITO-RREMEDIACIÓN, APLICANDO ANÁLISIS ENVOLVENTE DE DATOS.**



Msc. Jessica Machado

Miembro del Tribunal

CERTIFICADO DE APROBACIÓN POR EL TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

El tribunal de sustentación del proyecto de investigación y desarrollo aprueba el proyecto de Investigación/Trabajo de Integración Curricular titulado: **ANÁLISIS DE ESPECIES VEGETALES AMAZÓNICAS PARA REMOCIÓN DE METALES PESADOS (Cu, Cr, Pb, Ni), EN AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES MEDIANTE FITO-RREMEDIACIÓN, APLICANDO ANÁLISIS ENVOLVENTE DE DATOS.**



Msc. Danilo Pedro Sarabia Guevara

Miembro del Tribunal

CERTIFICADO DE PORCENTAJE DE SIMILITUD OBTENIDO EN EL

SISTEMA ANTI PLAGIO

Oficio No. 232-SAU-UEA-2020

Puyo, 3 de septiembre de 2020

Por medio del presente **CERTIFICO** que:

El Proyecto de Investigación correspondiente a los egresados COLLAGUAZO CEVALLOS MARLON FABRICIO con C.I. 1718432048 y PIURI GUZMÁN BRYAN ARTURO con C.I. 2100543509, con el Tema: **"ANÁLISIS DE ESPECIES VEGETALES AMAZONICAS PARA REMOCIÓN DE METALES PESADOS (Cu, Cr, Pb, Ni), EN AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES MEDIANTE FITO-RREMEDIACIÓN, APLICANDO ANÁLISIS ENVOLVENTE DE DATOS"**, de la carrera, Ingeniería Ambiental. Director del proyecto Ing. Bonilla Chango Mario Jorge, M.Sc., ha sido revisado mediante el sistema antiplagio URKUND, reportando una similitud del 7%, Informe generado con fecha 3 de septiembre de 2020 por parte del director conforme archivo adjunto.

Particular que comunico a usted para los fines pertinentes

Atentamente,



Ing. Italo Marcelo Lara Pilco M.Sc.
ADMINISTRADOR DEL SISTEMA ANTIPLAGIO URKUND – UEA - .

Agradecimiento

Agradezco a mis padres por darme todas las oportunidades de crecer académicamente, por apoyarme en todo momento incondicionalmente y orientarme en todos los momentos con sus consejos.

Gracias a todos los docentes de la Universidad Estatal Amazónica que nos brindaron todos sus conocimientos para poder tener un mejor nivel académico y por sus experiencias que nos dejan grandes enseñanzas.

Agradezco a los docentes que nos ayudaron a realizar el presente trabajo ya que, con sus opiniones, puntos de vista, atención e información necesaria se logró culminar esta etapa.

Agradezco a mi tutor Ing. Jorge Bonilla, por encaminarnos a realizar de mejor manera este proyecto y facilitarnos el trabajo con herramientas fundamentales.

Marlon Collaguazo

Agradecimiento

Principalmente quiero agradecer a Dios, por haberme dado siempre la fuerza y fortaleza para seguir adelante y superar cada uno de los obstáculos que se me presentó a lo largo de mi carrera universitaria.

A mis padres, por a haber deposita su confianza en mí y apoyarme de manera incondicional en cada una de mis decisiones que han contribuido en la formación de mis valores y carácter, logrando llegar a concluir con éxito esta tan anhelada meta.

A la Universidad Estatal Amazónica quiero expresar un profundo agradecimiento por brindarme la oportunidad de acogerme en sus aulas, a los docentes por cada una de sus clases impartidas las mismas que me ayudaron a crecer como persona y académicamente jugando un papel fundamental para la culminación de mis estudios.

Al Ing. Jorge Bonilla, tutor de nuestro proyecto de investigación, quien fue uno de los principales colaboradores durante este proceso, el mismo que con sus conocimientos y asesorías permitió de mejor manera realizar nuestro proyecto.

Bryan Piuri

Dedicatoria

Dedico esta tesis principalmente a mis padres ya que gracias a ellos he podio seguir mi carrera académica para poder llegar hacer un profesional mediante su amor incondicional, su esfuerzo, su respeto, su tiempo invaluable y que a través de sus enseñanzas he podido llegar hasta donde me encuentro el día de hoy.

A mis abuelos ya que con ellos pude entender que tan preciado es tener personas de mayor edad con un gran conocimiento, una gran virtud de solidaridad y a través de sus bendiciones he podido llegar sano a culminar mis estudios.

A mi madrina, padrino, mis primas Magali y Jenny, que gracias a ellos eh podido seguir adelante mediante su ayuda y cariño que me brindaron, ya que ellos son personas que han influido en mi formación académica.

A una persona muy en particular que fue mi compañía en una etapa muy corta de mi vida, pero me dejo grandes enseñanzas a través de su ejemplo y su carácter, por darme ánimos para seguir en busca de mis metas, apoyarme en los días más difíciles y ser el motivo de superación personal.

Y finalmente a mis amigos los cuales estuvieron desde los primeros días mí carrera universitaria con los que hemos pasados grandes y gratos momentos que ahora se los guarda con mucho aprecio.

Marlon Collaguazo

Dedicatoria

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado ese maravillosa regalo llamado vida y por permitirme llevar a cabo mis metas, objetivos y culminar una de las etapas más importantes de mi vida profesional.

A mis padres América y Arturo, quienes han sido los principales promotores de la búsqueda de mis sueños, por siempre confiar y creer en mis expectativas, orientándome hacer una mejor persona con cada uno de sus consejos, valores y principios que desde niños me han inculcado.

Dedico este trabajo a todas aquellas personas que dudaron y no creyeron en mí, aquellos que me subestimaron por no creerme capaz y a todos aquellos que creyeron que me rendiría en esta lucha, para esas personas y más está dedicado este trabajo para demostrar que cuando uno quiere se puede, que uno es capaz de luchar y lograr cada uno de los objetivos que nos planteemos con esfuerzo, sacrificio y dedicación.

Bryan Piuri

Resumen

Mediante la recolección de datos y búsqueda bibliográfica de estudios realizados con anterioridad se realizó un análisis comparativo de estudios de fitorremediación mediante el análisis envolvente de datos (DEA) en aguas contaminadas por metales pesados tales como: Cobre (Cu), Cromo (Cr), Plomo (Pb) y Níquel (Ni) llegando a determinar las concentraciones iniciales y finales del contaminante en las plantas a analizar tales como: *Limnobium laevigatum, Pistia stratiotes, Hydrilla verticillata*, *Typha latifolia, Schoenoplectus californicus, Limnocharis flava, Azolla filiculoides, Salvinia natans y Lemna minor*. Las plantas en estudio fueron sometidas a una concentración inicial de 450 mg/l de Cu, 264mg/l de Cr, 308 de Ni y 589 de Pb. Una vez obtenidos los datos se procedió a realizar el planteamiento y estructuración del modelo matemático DEA mediante la aplicación del programa MAXDEA, en donde se obtuvieron las entradas y salidas del contaminante inicial y final para proceder a la aplicación del mismo dándonos a conocer los resultados de eficiencia según la aplicación del modelo tipo frontera el mismo que se utilizó en este estudio al ser de mayor aceptación por parte de la comunidad investigadora. Finalmente mediante la aplicación del MAXDEA se llegó a determinar que las plantas *Lemna minor* y *Salvinia natans* fueron las que obtuvieron un mayor rango de eficiencia en cuanto a captación de metales pesados con un valor de 1 para *Lemna minor* y 0.96 para *Salvinia natans* dentro del rango de eficiencia absoluta impuesto por la metodología del DEA, por consiguiente se pudo establecer que la especie *Pistia stratiotes* fue la que obtuvo la eficiencia más baja con un valor de 0,82 entre las especies de estudio. Por lo tanto, se recomienda la utilización de *Lemna minor* y *Salvinia natans* para tratamientos biológicos de remoción de metales pesados en aguas residuales industriales debido a su gran capacidad de fitorremediadora y a sus bajos costes de aplicación.

Palabras claves

Fitorremediación, Metales pesados, macrófitas, Análisis envolvente de datos, eficiencia.

Abstract

Through of data collection and bibliographic search of studies carried out with anteriority, a comparative analysis of phytoremediation by means complete Data Envelopment Analysis (DEA) in water contaminated by heavy metals such as: Copper (Cu), Chromium (Cr), Lead (Pb) and Nickel (Ni),it was possible to determine that the concentrations of the contaminant in the plants to be analyzed such as: Limnobium laevigatum, Pistia stratiotes, Hydrilla verticillata, Typha latifolia, Schoenoplectus californicus, Limnocharis flava, Azolla filiculoides, Salvinia natans and Lemna minor. Once the data has been obtained, the DEA mathematical model was proposed and structured through the application of the MAXDEA program, where the inputs and outputs of the initial and final pollutant were obtained to proceed with its application, giving us the results of efficiency with respect to the application of the border-type model, the same that was used in this study as it is more widely accepted by the research community. Finally, by means the application of MAXDEA, it was determined that the Lemna minor and Salvinia natans plants were the ones that obtained a higher efficiency range in terms of heavy metal uptake with a value of 1 for Lemna minor and 0.96 for Salvinia natans within the range of absolute efficiency imposed by the DEA methodology, therefore thus it could be established that the Pistia stratiotes species was the one that obtained the lowest efficiency with a value of 0.82 among the study species. Therefore, the use of Lemna minor and Salvinia natans is recommended for biological treatments to remove heavy metals in industrial wastewater due to its great phytoremediation capacity and its low application costs.

Keywords

Phytoremediation, Heavy metals, macrophytes, Data enveloping analysis, efficiency.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN 1
1.1 Planteamiento del problema 2
1.2 Objetivos 3
1.3 Justificación 3
1.4 Marco legal 4
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO 7
2.1 Agua 7
2.2 Importancia del agua. 7
2.3 Contaminantes del agua 7
2.3.1 Plaguicidas o pesticidas 8
2.3.2 Productos farmacéuticos 8
2.3.3 Narcóticos 8
2.3.4 Subproductos y Aditivos industriales 9
2.4 Índice de calidad de agua 9
2.5 Aguas residuales 10
2.6 Tipos de aguas residuales 10
2.6.1 Aguas residuales industriales 10
2.6.2 Aguas Residuales Agrícolas 10
2.7 Metales Pesados 10
2.7.1 Cromo 11
2.7.2 Cobre 13
2.7.3 Plomo 14
2.7.4 Níquel 16
2.8 Fuentes de metales pesados 18
2.9 Contaminación por metales pesados 19
2.10 Restauración ambiental 19
2.11 Tratamiento Biológico de Aguas Residuales 19
2.12 Fitorremediación 20
2.13 Ventajas y desventajas de la fitorremediación 20
2.14 Tipos de fitorremediación 21
2.14.1 Rizofiltración 21
2.14.2 Fitoestabilización 21
2.14.3 Fitodegradación 21
2.14.4 Fitoextracción 22
2.14.5 Fitovolatización 22

2.15 Eficiencia de Fitorremediación 22
2.16 Sistemas aplicados a la fitorremediación acuática 22
2.16.1 Humedales artificiales 22
2.16.2 Sistema con plantas acuáticas flotantes 23
2.16.3 Sistema de tratamiento integral 23
2.16.4 Plantas acuáticas flotantes 24
2.17 Macrófitas acuáticas 24
2.18 Resistencia de las plantas a metales pesados 25
2.19 Acumulación de metales pesados en las plantas 25
2.20 El análisis envolvente de datos DEA 26
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA 28
3.1 Tipo de investigación 28
3.2 Métodos de investigación 29
3.3 Aplicación del análisis envolvente de datos 30
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS Y RESULTADOS 31
4.1 Inventario de plantas utilizadas para la fitorremediación de metales pesados. 31
CONCLUSIONES 45
RECOMENDACIONES 47
BIBLIOGRAFÍA 47

TABLAS

Tabla 1 8
Tabla 2 20
Tabla 3 31
Tabla 4 33
Tabla 5 34
Tabla 6 35
Tabla 7 37
Tabla 8 38
Tabla 9 39
Tabla 10 40
Tabla 11 41
Tabla 12 43
Tabla 13 44

FIGURAS

Figura 1. Cultivos acuáticos con plantas flotantes 23
Figura 2. Fotografía de la especie..... 31
Figura 3. Fotografía de la especie..... 33
Figura 4. Fotografía de la especie..... 34
Figura 5. Fotografía de la especie..... 35
Figura 6. Fotografía de la especie..... 37
Figura 7. Fotografía de la especie..... 38
Figura 8. Fotografía de la especie..... 39
Figura 9. Fotografía de la especie..... 40
Figura 10. Fotografía de la especie..... 41
Figura 11. Temperatura de las plantas para su adaptabilidad..... 42
Figura 12. Adaptabilidad mediante el pH del agua 43

ANEXOS

Anexo A1. Definición de variables en software MAXDEA 54
Anexo A2. Ingreso de datos al programa MAXDEA..... 54
Anexo A3. Definición de variables en el modelo..... 55
Anexo A4. Definición de variables en el modelo..... 55
Anexo A5. Sumary de aplicación de DEA..... 56
Anexo A6. Resultados de la eficiencia (ScoreBenchmarks) por medio del programa MAXDEA..... 56
Anexo A7. Resultados de (Dual values) mediante MAXDEA 57

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional y las actividades desarrolladas por el ser humano, han causado un gran impacto negativo al ambiente y en algunos casos irreparable, por lo que el agua al ser uno de los elementos más utilizados, es su vez es uno de los más afectados ya que su utilización se encuentra en las principales actividades de industrialización por su variada utilidad, el principal riesgo que se tiene es la contaminación por metales pesados por lo cual puede deteriorar ecosistemas enteros si el agua contaminada es vertida en los acuíferos naturales sin tener un tratamiento adecuado para disminuir su concentración de los contaminantes, provocando pérdidas de flora y fauna, como a su vez alteraciones grabes al ambiente y poner en riesgo la salud de los seres humanos (FAO, 1992).

Según la OPS (2017), 28 millones de personas carecen de agua potable, por lo que su fuente de hidratación es mediante el consumo de aguas de los ríos y aguas lluvias motivo por el cual es primordial el cuidado del agua ya que muchas personas, animales y vegetación se verían severamente afectadas por el agua contaminada de metales pesados.

En el Ecuador los ríos de la amazonia presentan cantidades de metales pesados para lo cual se ha tratado de implementar un sistema equitativo, equilibrado, sustentable que se maneje de una manera sencilla, económica y eficaz, para lo cual el sistema de depuración por fitorremediación es un opción viable, ya que su bajo costo y si fácil manejo hace de esta una técnica apropiada para el manejo de aguas residuales industriales (Carpio, 2013).

El presente proyecto propone un análisis de plantas amazónicas que tengan una capacidad depuradora de metales pesados de Cr, Cu, Ni y Pb enfocadas en aguas residuales industriales, ya que son fuentes primarias de contaminación de afluentes del agua para lo cual se ha tomado en consideración realizar un inventario de las plantas que se ocupara en la presente investigación, para lo cual se tomara en cuenta su adaptabilidad, el tipo de contaminantes que captara y la eficiencia de la planta con respecto a los contaminantes depurados.

Para poder determinar la eficiencia de las plantas depuradoras en presencia de los metales pesados se aplicará un análisis envolvente de datos, el cual mediante un programa matemático llamado MAXDEA determinará la planta con mayor eficiencia para la depuración de metales pesados.

1.1 Planteamiento del problema

Actualmente la contaminación del agua se ha convertido en un problema de escala global, ya sea por el crecimiento demográfico o por el aumento de la industrialización en los grandes países. La industrialización ha sido fundamental desde que el ser humano decidió evolucionar tecnológicamente, por ende la necesidad de mejorar los medios de producción y optimizar las actividades productivas han generado un deterioro en la calidad del agua debido a la aplicación de sustancias químicas contaminantes, las cuales generan del producto de sus actividades diferentes tipos de residuos que no se degradan fácilmente, son persistentes o bioacumulables las cuales acarrean consigo efectos nocivos degradando los factores ambientales (Tamayo & Esquivel, 2014).

En Ecuador y América Latina se estima que el 80% de las enfermedades son causadas por un abastecimiento de agua insalubre. De hecho, alrededor del 90% de la contaminación generada en las zonas urbanas y rurales se transporta por los ríos que posteriormente desembocan en el mar. Según Benítez, Torres, & Ochoa (2018) afirma que "alrededor del 81% de la contaminación de los ríos se produce por aguas residuales domésticas y el 19% por descargas industriales, conteniendo así elevadas concentraciones de materia orgánica, metales, plásticos, y contaminantes emergentes que alteran los ecosistemas y ponen en riesgo a la salud humana".

En la Amazonía ecuatoriana la contaminación de recursos hídricos se ha hecho muy evidente, principalmente las que son generadas por las industrias de minera e hidrocarburos las cuales producto de sus actividades generan residuos que contienen un nivel elevado de metales pesados tales como: Plomo (Pb), Cromo (Cr), Cobre (Cu) y Níquel (Ni), para ello se ha definido una técnica que nos ayude a la remoción de los mismos sin alterar la dinámica de los ecosistemas, mediante la aplicación de fitorremediación una ecotecnología basada en la capacidad de las plantas para absorber, acumular, metabolizar, volatilizar o estabilizar contaminantes presentes en el suelo, aire agua o residuos de sedimentos con metales pesados, cómo se pudo constatar en el estudio aplicado por Muños (2010), en el caso del tratamiento de aguas afectadas por el derrame de petróleo de la línea de flujo del pozo SHUSHUQUI #13 cantón Lago Agrio, Provincia de Sucumbíos donde se obtuvieron resultados óptimos de la remoción de metales pesados en medios acuáticos mediante la aplicación de plantas con capacidades remediadoras, presentándola como una alternativa sustentable, de bajo costo y con una

alta aplicabilidad para rehabilitar los ambientes afectados (Delgadillo, González, Prieto, Villagómez, & Acevedo, 2011)

1.2 Objetivos

Objetivo General

- Analizar la eficiencia de especies vegetales de la Amazonía utilizadas en la remoción de metales pesados (Pb, Cr, Cu, Ni) mediante la técnica de fitorremediación en aguas residuales aplicando el análisis envolvente de datos.

Objetivos Específicos

- Realizar un inventario de las especies vegetales que se utilizan para la remoción de metales pesados en la Amazonía ecuatoriana.
- Analizar las técnicas utilizadas en la remoción de metales pesados (Pb, Cr, Cu, Ni) mediante la aplicación de fitorremediación.
- Describir las especies vegetales y técnicas óptimas para la remoción de metales pesados en aguas residuales industriales a través de la fitorremediación.

1.3 Justificación

En el Ecuador la industrialización ha ido avanzando por lo que en la actualidad se ha hecho evidente la contaminación de los recursos hídricos con metales pesados, provenientes principalmente de las industrias de hidrocarburos y minería, las cuales descargan sus aguas residuales a los cuerpos de agua generando enfermedades, pérdida de biodiversidad, conflictos ambientales e incumplimiento de la normativa ambiental vigente.

Es entonces que surge la necesidad de solucionar la problemática generada por la contaminación de las aguas residuales con metales pesados, provenientes de las industrias y por consiguiete la aplicación de la técnica de fitorremediación como una alternativa para tratar las aguas residuales con contenido de metales pesados, dicha técnica puede aportar una solucion con una baja taza de costos y obtener resultados óptimos y viables.

Es por eso, que el siguiente proyecto de investigacion pretende determinar la especie y técnica óptima para el tratamiento de metales pesados haciendo un análisis de la eficiencia de las especies vegetales para la remoción de metales como: Cu, Cr, Pb y Ni, mediante la revisión de bibliografia obtenida que son verificadas a través de los

análisis realizados y corroborados por trabajos posteriores los cuales nos permitieron aportar en la aplicación de proyectos futuros enfocados a la fitorremediación de metales en aguas residuales industriales.

1.4 Marco legal

Según la Constitución de la República del Ecuador 2008, Capítulo segundo, Derechos del buen vivir, sección primera; agua y alimentación.

Art. 12.- El derecho humano al agua es fundamental e irrenunciable. El agua constituye patrimonio nacional estratégico de uso público, inalienable, imprescriptible, inembargable y esencial para la vida.

Sección segunda; ambiente sano

Art. 14.- Se reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, sumak kawsay. Se declara de interés público la preservación del ambiente, la conservación de los ecosistemas, la biodiversidad y la integridad del patrimonio genético del país, la prevención del daño ambiental y la recuperación de los espacios naturales degradados.

Art. 15.- El Estado promoverá, en el sector público y privado, el uso de tecnologías ambientalmente limpias y de energías alternativas no contaminantes y de bajo impacto. La soberanía energética no se alcanzará en detrimento de la soberanía alimentaria ni afectará el derecho al agua. Se prohíbe el desarrollo, producción, tenencia, comercialización, importación, transporte, almacenamiento y uso de armas químicas, biológicas y nucleares de contaminantes orgánicos persistentes altamente tóxicos, agroquímicos internacionalmente prohibidos, y las tecnologías y agentes biológicos experimentales nocivos y organismos genéticamente modificados perjudiciales para la salud humana o que atenten contra la soberanía alimentaria o los ecosistemas, así como la introducción de residuos nucleares y desechos tóxicos al territorio nacional.

Capítulo séptimo derechos de la naturaleza

Art. 71.- La naturaleza o Pacha Mama, donde se reproduce y realiza la vida, tiene derecho a que se respete integralmente su existencia y el mantenimiento y regeneración de sus ciclos vitales, estructura, funciones y procesos evolutivos. Toda persona, comunidad, pueblo o nacionalidad podrá exigir a la autoridad pública el cumplimiento de los derechos de la naturaleza. Para aplicar e interpretar estos derechos se observarán los principios establecidos en la Constitución, en lo que proceda. El Estado incentivará a las personas naturales y jurídicas, a los colectivos para que protejan la naturaleza y promoverá el respeto a todos los elementos que forman un ecosistema.

Art. 72.- La naturaleza tiene derecho a la restauración. Esta restauración será independiente de la obligación que tiene el Estado y las personas naturales o jurídicas de indemnizar a los individuos y colectivos que dependan de los sistemas naturales afectados.

En los casos de impacto ambiental grave o permanente, incluidos los ocasionados por la explotación de los recursos naturales no renovables, el Estado establecerá los mecanismos más eficaces para alcanzar la restauración, y adoptará las medidas adecuadas para eliminar o mitigar las consecuencias ambientales nocivas.

Art. 73.- El Estado aplicará medidas de precaución y restricción para las actividades que puedan conducir a la extinción de especies, la destrucción de ecosistemas o la alteración permanente de los ciclos naturales. Se prohíbe la introducción de organismos y material orgánico e inorgánico que puedan alterar de manera definitiva el patrimonio genético nacional.

Art. 74.- Las personas, comunidades, pueblos y nacionalidades tendrán derecho a beneficiarse del ambiente y de las riquezas naturales que les permitan el buen vivir. Los servicios ambientales no serán susceptibles de apropiación; su producción, prestación, uso y aprovechamiento serán regulados por el Estado.

Según el código orgánico del ambiente considera

Que, el artículo 14 de la Constitución de la República del Ecuador reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, sumak kawsay. Se declara de interés público la preservación del ambiente, la conservación de los ecosistemas, la biodiversidad y la integridad del patrimonio genético del país, la prevención del daño ambiental y la recuperación de los espacios naturales degradados.

El artículo 15 de la Constitución de la República del Ecuador ordena que el Estado promoverá, en el sector público y privado, el uso de tecnologías ambientalmente limpias y de energías alternativas no contaminantes y de bajo impacto. La soberanía energética no se alcanzará en detrimento de la soberanía alimentaria, ni afectará el derecho al agua. Se prohíbe el desarrollo, producción, tenencia, comercialización, importación, transporte, almacenamiento y uso de armas químicas, biológicas y nucleares, de contaminantes orgánicos persistentes altamente tóxicos, agroquímicos internacionalmente prohibidos, y las tecnologías y agentes biológicos experimentales nocivos y organismos genéticamente modificados perjudiciales para la salud humana o

que atenten contra la soberanía alimentaria o los ecosistemas, así como la introducción de residuos nucleares y desechos tóxicos al territorio nacional.

Que, el artículo 276, número 4, de la Constitución de la República del Ecuador, establece que uno de los objetivos del régimen de desarrollo será recuperar y conservar la naturaleza y mantener un ambiente sano y sustentable que garantice a las personas y colectividades el acceso equitativo, permanente y de calidad al agua, aire, suelo y a los beneficios de los recursos del subsuelo y del patrimonio natural.

Que, el artículo 411 de la Constitución de la República del Ecuador dispone que el Estado garantizará la conservación, recuperación y manejo integral de los recursos hídricos, cuencas hidrográficas y caudales ecológicos asociados al ciclo hidrológico. Se regulará toda actividad que pueda afectar la calidad y cantidad de agua, y el equilibrio de los ecosistemas, en especial en las fuentes y zonas de recarga de agua. La sustentabilidad de los ecosistemas y el consumo humano serán prioritarios en el uso y aprovechamiento del agua.

Que, el artículo 413 de la Constitución de la República del Ecuador dispone que el Estado promoverá la eficiencia energética, el desarrollo y uso de prácticas y tecnologías ambientalmente limpias y sanas, así como de energías renovables, diversificadas de bajo impacto y que no pongan en riesgo la soberanía alimentaria, el equilibrio ecológico de los ecosistemas ni el derecho al agua.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Agua

Según FAO (2015), el agua es un recurso hídrico importante para la vida y a su vez para el mismo desarrollo, por lo cual se debe tener en cuenta el impacto que se tiene una vez sea utilizado, para esto se han desarrollado diferentes tipo de tecnologías que permitan garantizar un estado óptimo de este recurso. El uso del agua ha ido en aumento por la demanda en las industrias por ser este el recurso más indispensable para su producción, a eso se suma la presencia de contaminantes que se encuentran en los diferentes tipos de afluentes naturales los cuales son seriamente afectados por tener presencia de contaminantes como metales pesados y carga orgánica.

2.2 Importancia del agua.

El agua tiene diferentes tipos de estado (sólido, líquido y gaseoso), lo cual mediante su interacción con el ecosistema ayuda a controlar la temperatura del planeta por la asociación que existe mediante la evaporación de agua, la misma que al estar en estado gaseoso sube a la atmósfera y en conjunto al efecto invernadero mantiene una temperatura de 30º C lo que hace que se tenga una óptima condición climática para el desarrollo de la vida (Valdez & Uribe, 2016).

La cantidad global de agua está constituida por el 97% de agua salada presente en los océanos, mientras que apenas un 3% es de agua dulce que está presente mediante precipitaciones, en corrientes de agua natural como vertientes de nevados y aguas subterráneas y apenas un 0.9% es destinada para consumo humano por lo cual es de suma importancia tratar de disminuir el impacto que se tiene a este elemento vital (Valdez & Uribe, 2016).

2.3 Contaminantes del agua

El crecimiento demográfico ha conllevado que las fuentes naturales de agua se vean severamente afectadas por los diferentes tipos de actividades que el ser humano realiza, como la agricultura, ganadería, pesca, minería, industria textil, industria química y sobre todas ellas la actividad antropogénica que mayor impacto tiene es la extracción del petróleo y gas licuado, de tal manera se tiene contacto directo con metales pesados y sustancias de alta concentración de contaminantes, a esto se lo denomina como contaminantes emergentes donde se conoce la naturaleza química y el origen, estos compuestos pueden pasar inadvertidos en el entorno lo que puede provocar efectos

negativos y destructivos en el ambiente como a su vez puede tener efectos negativos para la salud (Caviedes, Delgado, & Olaya, 2016).

A continuación, se detallará los tipos de contaminantes emergentes que se encuentran en el agua.

2.3.1 Plaguicidas o pesticidas

Los plaguicidas son sustancias sumamente toxicas ya pueden ser simples o compuestas que sirven para destruir, prevenir, mitigar o repeler las plagas la cual se encuentra detallada en la Tabla 1, este tipo de sustancias han generado un impacto severo en aguas subterráneas con una gran concentración de contaminantes por el uso excesivo del sector agrícola. El heptacloro y atrazina son dos sustancias tóxicas que están prohibidas por ser bioacumulables y persistentes en el entorno natural las cuales poseen gran una cantidad de concentración tóxica mismas que pueden cusas severas enfermedades en la salud como defectos congénitos y cáncer hepático que sino no son tratadas a tiempo pueden provocar la muerte (Gil, Soto, Usma, & Gutiérrez, 2012).

Tabla 1

Clasificación de los plaguicidas de acuerdo a su toxicidad

Clase	Toxicidad
Clase IA.	Sumamente tóxico
Clase IB.	Muy tóxico
Clase II.	Moderadamente tóxico
Clase III.	Ligeramente tóxico

Nota. Análisis de especies vegetales amazónicas para remoción de metales pesados (Cu, Cr, Pb, Ni), en aguas residuales industriales mediante fitorremediación, aplicando análisis envolvente de datos, by OMS, (1975), pág. 6 - 8. Copyright (1975) World Health Organization.

2.3.2 Productos farmacéuticos

El gran impacto qua han tenido esto residuos después de su uso, ha provocado una preocupación ambiental mediante la excreción humana, desperdicios farmacéuticos y sobrante de insumos, por lo cual medicamentos como (ibuprofeno, diclofenaco, carbamazepina y ácido clofibrico) causan la degradación del suelo y también pueden llegar hacia aguas subterráneas conectándose con acuífero naturales (Gil et al., 2012).

2.3.3 Narcóticos

Es importante tener en cuenta este aspecto por el tipo producción que tienen este tipo de sustancias ilícitas, para lo cual es necesario una gran cantidad de agua la misma

que es contaminada con compuestos químicos de gran peligrosidad y son arrojadas hacia fuentes naturales por laboratorios clandestinos, por lo tanto, las sustancias ilícitas y los metabolitos son recalcitrantes para la eliminación mediante tratamientos convencionales por lo que se debe ocupar procesos de osmosis, ozonización, oxidación avanzada entre otros, pero debido al elevado costo de estos tratamientos hace que entren en contacto con las aguas superficiales. Los contaminantes que más se han podido evidenciar a través de estudios son: la norcocaína, heroína, metanfetamina, morfina y MDMA (3,4-metilendioximetanfetamina) (Gil et al., 2012).

2.3.4 Subproductos y Aditivos industriales

Existe una gran cantidad de compuestos que desembocan en los afluentes naturales lo cual provoca una serie de impactos ambientales como también en la salud, los compuestos que con mayor frecuencia se encuentran son: hidrocarburos de petróleo, plastificantes, bisfenoles, ftalatos, los cuales al entrar en contacto con el agua subterránea donde se lixivian. La degradación de micro contaminantes producen dioxinas las cuales pueden causar problemas de salud afectando directamente al sistema inmunitario, problemas en el desarrollo y la reproducción, la misma que interfiere con las hormonas y provoca el cáncer (Gil et al., 2012).

2.4 Índice de calidad de agua

Para analizar la calidad de agua se debe tener en cuenta que existen valores independientes de las propiedades del agua, para lo cual se deben fijar las características que se va a estudiar o sea de intereses predeterminado, mediante la naturaleza multivariada que posee el agua se debe especificar el tipo de análisis que se desea conocer, esto reducirá a un valor único, el cual nos dará como resultado el estado de salud que posee (Quiroz, Izquierdo, & Menéndez, 2017).

En la actualidad existen más de 30 índices que aseguran la calidad de agua y que son de uso común, en lo cual se debe incluir al menos tres de estos parámetros que son muy importantes como: Solidos Disueltos Totales (SDT), Demanda Bioquímica de Oxigeno (DBO), metales pesados, potencial de hidrogeno (pH), Oxígeno disuelto (OD) y nitrógeno amoniacal ($N - NH_4^{++}$) (Quiroz et al., 2017).

Para realizar un índice de calidad de agua se deben tomar tres aspectos fundamentales: (I) **Selección de parámetros,** se debe tener en cuenta los criterios de las entidades gubernamentales, agencias o expertos, los cuales determinaran su importancia mediante el ámbito legislativo, donde se debe seleccionar 5 categorías que son primordiales tales

como: (1) Características físicas, (2) Nivel de oxígeno, (3) Sustancias disueltas (4) Aspectos de salud, (5) eutrofización. (II) **Determinar las funciones de la calidad para cada uno de los parámetros,** se lo conoce también como subíndice que tiene por objetivo trasformar las variables hacia una escala adimensional, lo cual se tomara en cuenta las unidades en las que se expresen, (unidades, porcentajes, mg/L, etc.), para conocer la agresión, (III) **Agresión de subíndices mediante expresión matemática,** mediante este aspecto se utilizaran los promedios ya sean geométricos, aritméticos, armónicos o ponderados (Fernández, Ramírez, & Solano, 2003).

2.5 Aguas residuales

Las aguas residuales son el resultado del uso comercial, industrial, doméstico e institucional del recurso agua, conteniendo partículas o sustancias tóxicas que perjudican o alteran al estado natural del agua, mediante la acumulación de aguas residuales las mismas que producen gases mal olientes debido a la degradación y descomposición de toda materia orgánica lo cual al contar con varios microorganismos patógenos son causantes de enfermedades (Figueroa & Scarlett, 2018).

2.6 Tipos de aguas residuales

2.6.1 Aguas residuales indústriales

La composición de estas aguas varían dependiendo el tipo de actividad industrial en que se ocupe, por lo que pueden contener excesivas cantidades de compuestos tales como plaguicidas y metales pesados, a su vez elementos tóxicos los mismos que son plomo, níquel, cobre, mercurio entre otros (Figueroa & Scarlett, 2018).

2.6.2 Aguas Residuales Agrícolas

Estas aguas provienen de zonas rurales procedentes de las labores agrícolas donde existe una gran demanda de empleos que se dedican principalmente a la producción donde prima la flora y el cultivo donde utilizan para regar sus sembríos y son fuentes primarias de contaminación de pesticidas y plaguicidas (Figueroa & Scarlett, 2018).

2.7 Metales Pesados

Los metales pesados son tóxicos ambientales muy peligrosos. Sus características más comunes son: persistencia, bioacumulación, biotransformación y elevada toxicidad, lo cual hace que se encuentren en los ecosistemas por largos periodos, ya que su degradación natural es difícil. Se define a los metales pesados como elementos de elevado peso atómico, potencialmente tóxicos que se emplean en procesos industriales

tales como: Cromo (Cr), Cobre (Cu), Plomo (Pb), Mercurio (Hg) y Níquel (Ni) que incluso en bajas concentraciones, pueden ser nocivos para las plantas y los animales (Camacho & Ariosa, 2000).

Según Ruiz (2010), no existe una definición concreta para describir a los metales pesados, pero, se refiere a ellos como un conjunto de elementos incluyendo también algunos de sus compuestos que suelen ser de carácter metálico, aunque también comprenden cierto número de elementos semimetálicos, incluso no metálicos y tienen un alto grado de contaminación, toxicidad o ecotoxicidad. Cuando se trata del daño que suponen estos químicos para el medio ambiente o para el hombre, es importante tomar en consideración la definición de los metales pesados según su toxicidad.

2.7.1 Cromo

El cromo (Cr) es un elemento químico con un peso atómico de 51.996, número atómico 24 que tiene un color que se aproxima a un blanco plateado, quebradizo y duro el cual al estar en un estado más puro es de consistencia dúctil, y suave cuando éste metal no está tensionado, una de las utilidades que se tiene para el elemento son las aleaciones anticorrosivas y recubrimientos en galvanizados, el cromo elemental no se encuentra en la naturaleza. Entre sus propiedades mecánicas tenemos su resistencia a la tensión, capacidad baja para el forjado entre otras propiedades de su manejo, no posee carbono, oxígeno, nitrógeno e hidrogeno (Lenntech, 2008).

2.7.1.1 Nivel de toxicidad del cromo.

El cromo tiene niveles de toxicidad de los cuales se derivan el Cr (3) y Cr (+6) tiene por característica principal penetrar el organismo de manera muy sencilla por lo que el Cr (3) no es comprobado como cancerígeno mientras que el Cr (6) si es considerado como cancerígeno para la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer.

La presencia tóxica de este elemento se encuentra principalmente en el Cr (6) por lo cual afecta directamente al cutis dejándolo más sensible y expuesto a inflamaciones por la interacción de biomoléculas, otro factor que hay que tomar en consideración es que produce una grave alteración de las cromátidas hermanas , reacciones sobre la cadena del ADN y alteraciones cromosómicas (Cuberos, Rodríguez, & Prieto, 2009).

2.7.1.2 Riesgo ambiental.

La contaminación mediante este elemento es producida por las diferentes actividades antropogénicas por lo que el aumento del cromo en el aire puede provocar

que el carbón presente en forma particular se queme a una mayor velocidad, mientras que en el elemento agua se contamina mediante las descargas de efluentes con altas concentraciones de contaminantes como las aguas provenientes de mecánicas, colorantes, pigmentos proveniente de la industria de cuero, mientras que en el suelo se contamina por el almacenamiento de carbón en las plantas eléctricas.

Las partículas de cromo que están presentes en el aire pueden estar suspendidas por largo tiempo por lo que pueden viajar extensas distancias, el cromo tiene una particular forma de oxidación que es muy grave y se reduce a Cromo (+3) de manera inmediata cuando entra en contacto con soluciones con material orgánico (Montoya, Casas, & Wandurraga, 2010).

2.7.1.3 Abundancia y obtención.

Para obtener el cromo se lo hace a través de la Cromita ($FeCr_2O_4$) por lo que se debe calentar la cromita implementado el silicio o el aluminio, la producción más grande de cromita está ubicado en el continente de África en los países de Turquía, Kazajistán y la India donde se obtuvo quince millones de toneladas de cromita solo en el año 2000 para la cual se destina un 70% en aleaciones inoxidables como por ejemplo tenemos al ferrocromo que se produce por la aleación entre el hierro y el cromo (Cruz et al., 2012).

2.7.1.4 Efectos del cromo sobre la salud.

Este elemento químico puede ser muy peligroso para la salud de los humanos ya que están relacionados a distintas enfermedades y afectaciones para las personas que trabajan en la industria textil y acero como a su vez puede ser provocada por el consumo de tabaco, el cromo puede ser ingerido por medio de las respiración al comer, beber y a través del contacto directo con el elemento químico, el cromo (+3) se encuentra principalmente en los alimentos vegetales, frutas, levaduras, granos y carnes mientras que el cromo (6) es nocivo para la salud provocando en el cuerpo daños irreparables (Lenntech, 2008).

Cusas de enfermedades por el cromo

- Cáncer al pulmón
- Erupciones cutáneas
- Alteraciones del material genético
- Debilitamiento del sistema inmune
- Malestar de úlceras en el estomago

- Daño al hígado y a los riñones

2.7.2 Cobre

El Cobre (Cu) es un elemento químico con un peso atómico de 1.28, número atómico 29 el mismo que es de alta demanda en todo tipo de industria por consiguiente es el no metal más demandado de los elementos, debió a sus propiedades físicas, químicas y mecánicas, también fue uno de los metales que ha sido usado trascendentalmente por los humanos, de la variedad de compuestos que tiene el cobro solo unos pocos son utilizados por la industria en gran magnitud. El sulfato de cobre (II) (CuSO4) y el naftenato de cobre utilizado para prevenir la putrefacción de madera, cuerdas, redes de pesca y telas una de entre tantas aplicaciones que se tiene del cobre se fija en la agricultura mediante insecticidas y fungicidas (Lenntech, 2011).

2.7.2.1 Nivel de toxicidad del cobre.

La concentración del cobre presente en el aire varía desde 1 nanogramo que equivale a 4/1,000,000,000 en una onza o 1/1,000,000,000 de gramos dentro de un metro cúbico de aire, por lo que el cobre presente en el aire puede alcanzar una concentración de 5000 ng/m3 por lo que puede afectar al sistema respiratorio provocando severas afecciones en los pulmones. En el agua el nivel de concentración es de 1 300 partes por billón de cobre de partes de agua, y se ve severamente afectado si el agua se transporta por tuberías de cobre por lo cual varía entre 75–20 ppm, pero existen hogares que tienen una concentración de cobre más elevada por lo que llega a 1000 ppm (ATSDR, 2004).

2.7.2.2 Riesgo ambiental.

Mediante el uso del cobre el impacto que han generado las industrias en el ambiente han provocado alteraciones en los afluentes naturales provocando pérdidas de especies tanto animales y vegetales como a su vez ha alterado el ciclo natural del agua, exponiendo a los humanos a un desastre antropogénico que se ve afecto en la salud, el aire se contamina por emanaciones de combustión de este elemento por lo que se mantiene suspendido hasta cuando exista una lluvia de por medio, en el suelo las consecuencias hacen que los microorganismo naturales mueran lo que provoca que la materia orgánica pierda su capacidad de descomposición (Lenntech, 2011).

2.7.2.3 Abundancia y obtención.

El cobre es uno de los elementos químicos que más abunda en el mundo por lo que se estima que durará mucho tiempo para que se agote este elemento, pero, la mayor

parte del cobre que se extrae proviene de Estados Unidos principalmente del estado de Michigan donde se obtienen por medio de sulfuros minerales como la bornita, calcopirita, covelita, calcocita, calcopirita y enargita, por lo que el grado del mineral en producción van disminuyendo mientras que la demanda del cobre aumentará (Lenntech, 2011).

2.7.2.4 Efectos del cobre sobre la salud.

El cobre tiene afecciones más graves cuando se está expuesto directamente por lo que puede provocar necrosis hepática o incluso la muerte, mientras que a los niños por comer en recipientes de cobre pueden provocar lesiones hepáticas, el cobre provoca anemia hipocrómica, altera el crecimiento, insuficiencia cardiaca y problemas de infertilidad temporal, las sales solubles en excesivas concentraciones provoca una inflamación aguda en la mucosa del estómago, la exposición a largos periodos con este elemento puede provocar irritaciones en la nariz, ojos y la boca, causando dolores de cabeza, vómito y diarreas. La ingesta en gran cantidad puede causas daño en los riñones y el hígado e incluso puede llegar a la muerte (Londoño, Londoño, & Muñoz, 2016).

2.7.3 Plomo

Es un metal gris-azulado muy conocido que existe naturalmente en pequeñas cantidades en la corteza terrestre. Se encuentra ampliamente distribuido en el ambiente, la mayor parte proviene de actividades como la minería, manufactura industrial y de quemar combustibles fósiles.

El plomo es un elemento químico de la tabla periódica, cuyo símbolo es Pb (del latín Plumbum) y su número atómico es 82 según la tabla actual, el plomo es muy resistencia a la corrosión atmosférica y al ataque de los ácidos, por lo que hace que es muy útil en la aplicación del sector industrial (EcuRed, 2015).

2.7.3.1 Nivel de toxicidad del plomo.

El plomo es un metal tóxico el cual se presenta de forma natural en la corteza terrestre, es muy utilizado y aplicado en distintos campos de la industrialización, causando grandes problemas de importancia ambiental debido a los altos niveles de contaminación que este posee. El plomo se caracteriza por ser un material tóxico capaz de contaminar el cuerpo y provocar una enfermedad conocida como plumbosis o saturnismo. El plomo se absorbe por vía cutánea, respiratoria y digestiva, afectando el sistema nervioso y renal.

Entre sus posibles efectos adversos figuran el daño renal, la anemia por destrucción de la hemoglobina sanguínea, daño cerebral, vértigos, vómitos, diarreas, abortos, disminución de la fertilidad y dificultades de aprendizaje en niños (Enciclopedia, 2016).

2.7.3.2 Riesgo ambiental.

El plomo es un potente contaminante que se ha detectado incluso entre las aguas congeladas de los polos terrestres. Su elevada concentración ambiental se debe a las actividades industriales humanas, en especial a su adición al proceso de combustión de motores. Por eso, se lo ha prohibido como aditivo en la gasolina.

El envenenamiento de los animales con plomo les restringe sus capacidades innatas de geolocalización de equilibrio y magnetocepción. Además, induce a mutaciones, así como comportamientos erráticos y agresivos (Enciclopedia, 2016).

2.7.3.3 Abundancia y obtención.

El plomo es bastante abundante en la superficie terrestre, pero nunca en su estado elemental, sino como sulfuro de plomo, parte del mineral conocido como galena. También se lo puede hallar en forma de fosfatos (la llamada piromorfita), carbonatos (la cerusita), sulfatos (la anglesita) y otros numerosos óxidos.

El plomo aparece también como consecuencia última de la degradación natural de muchos materiales radiactivos, razón por la cual se lo puede encontrar asociado al uranio (U) y el torio (Th) (Enciclopedia, 2016).

2.7.3.4 Efectos del plomo sobre la salud.

El Plomo es un metal blando que ha sido conocido a través de los años por muchas aplicaciones. Este ha sido usado ampliamente desde el 5000 antes de Cristo para aplicaciones en productos metálicos, cables y tuberías, pero también en pinturas y pesticidas. El plomo es uno de los cuatro metales que tienen un mayor efecto dañino sobre la salud humana. Este puede entrar en el cuerpo humano a través de la comida (65%), agua (20%) y aire (15%) (Lenntech, 2014).

Las comidas como fruta, vegetales, carnes, granos, mariscos, refrescos y vino pueden contener cantidades significantes de Plomo, el humo de los cigarros también contiene pequeñas cantidades de plomo.

El Plomo puede entrar en el agua potable a través de la corrosión de las tuberías. Esto es más común que ocurra cuando el agua es ligeramente ácida. Este es el porqué de los sistemas de tratamiento de aguas públicas son ahora requeridos llevar a cabo un ajuste de pH en agua que sirve para el uso del agua potable. Que nosotros sepamos, el Plomo

no cumple ninguna función esencial en el cuerpo humano, este puede principalmente hacer daño después de ser tomado en la comida, aire o agua (Lenntech, 2014).

El Plomo puede causar varios efectos no deseados en dependencia del grado de concentración como son:

- Perturbación de la biosíntesis de hemoglobina y anemia.
- Incremento de la presión sanguínea.
- Daño a los riñones
- Aborto y abortos sutiles
- Perturbación del sistema nervioso
- Daño al cerebro
- Disminución de la fertilidad en los hombres
- Disminución de habilidades de aprendizaje en los niños
- Comportamiento impulsivo he hipersensibilidad.

2.7.4 Níquel

El níquel (Ni) es un metal brillante plateado-blanco y con un ligero matiz dorado, que se encuentra con una abundancia en la corteza terrestre del 0,008%. Es un material dúctil y maleable por lo que se puede laminar, pulir y forjar fácilmente. El níquel presenta una aceptable resistencia al calor fundiendo a la temperatura de 1455 ºC, y posee propiedades magnéticas a temperatura ambiental, aunque menores a las del hierro. Su peso específico es de 8,9 gr/cm^3.

El níquel, además de ser un material versátil, es un buen conductor de la electricidad y del calor, resistente a la corrosión y a las altas temperaturas. Debido a sus excelentes propiedades anticorrosivas y de resistencia al calor, el níquel es un material ampliamente empleado en la industria, sobre todo en la industria química y de alimentos. Además, el níquel tiene muchos usos domésticos como son la fabricación de recipientes de cocina, utensilios de casa y herramientas en general. Es por lo tanto un metal de gran demanda y esencial para la industria y la vida cotidiana (Lenntech, 2015).

2.7.4.1 Nivel de toxicidad del níquel.

El níquel puro es un metal duro, blanco-plateado, que tiene propiedades que lo hacen muy deseable para combinarse con otros metales y formar mezclas llamadas aleaciones. Los niveles de toxicidad del Níquel no son muy elevados, se sospecha que los vapores de sulfato de níquel son cancerígenos o que pueden generar complicaciones cuando se está expuesto a este material en grandes cantidades. El efecto adverso más

común de la exposición al níquel en seres humanos es una reacción alérgica (Agencia para sustancias toxicas y registro de enfermedades, 2019).

Aproximadamente 10 a 20% de la población es sensible al níquel. Una persona puede sensibilizarse al níquel cuando joyas u otras cosas que contienen níquel están en contacto directo y prolongado con la piel. El uso de aretes que contienen níquel en orejas perforadas puede también sensibilizar a una persona al níquel.

2.7.4.2 Riesgo ambiental.

El níquel es liberado al aire por las plantas de energía y las incineradoras de basura. Este se depositará en el suelo o caerá después de reaccionar con las gotas de lluvia. Usualmente lleva un largo periodo de tiempo para que el níquel sea eliminado del aire. El mismo que puede también terminar en la superficie del agua cuando es parte de las aguas residuales (EcuRed, 2015).

La mayor parte de todos los compuestos del níquel que son liberados al ambiente se absorberán por los sedimentos o partículas del suelo y llegará a inmovilizarse. En suelos ácidos, el níquel se une para llegar a ser más móvil y a menudo alcanza el agua subterránea. No hay mucha más información disponible sobre los efectos del níquel sobre los organismos y los humanos.

Sabemos que altas concentraciones de níquel en suelos arenosos puede claramente dañar a las plantas y altas concentraciones de níquel en aguas superficiales puede disminuir el rango de crecimiento de las algas, los microorganismos pueden también sufrir una disminución del crecimiento debido a la presencia de níquel, pero, ellos usualmente desarrollan resistencia al níquel.

Para los animales el níquel, es un elemento esencial en pequeñas cantidades. Pero el níquel no es sólo favorable como elemento esencial; puede ser también peligroso cuando se excede la máxima cantidad tolerable, esto puede causar varios tipos de cánceres en diferentes lugares de los cuerpos de los animales mayormente en aquellos que viven cerca de refinerías. No es conocido que el níquel se acumule en plantas o animales (EcuRed, 2015).

2.7.4.3 Abundancia y obtención.

El níquel aparece en forma de metal en los meteoritos junto con el hierro (formando las aleaciones kamacita y taenita) y se encuentra en el núcleo de la Tierra también junto al hierro e iridio, formando entre estos tres metales una aleación increíblemente dura y pesada cuando el planeta ardía.

Combinado se encuentra en minerales diversos como garnierita, millerita, pentlandita y pirrotina. Las minas de Canadá, Cuba y Rusia producen hoy día el 70% del níquel consumido. Otros productores son Bolivia, Colombia, Puerto Rico, Nueva Caledonia provincia de Ultramar de Francia y República Dominicana (EcuRed, 2015).

2.7.4.4 Efectos del níquel sobre la salud.

El níquel es un elemento que se encuentra en el ambiente sólo en muy pequeños niveles. Los humanos usan el níquel para muchas aplicaciones diferentes, la utilización más común del níquel es el uso como ingrediente del acero y otros productos metálicos. Este puede ser encontrado en la elaboración de joyería. Los alimentos naturalmente contienen pequeñas cantidades de níquel.

Los humanos pueden ser expuestos al níquel al respirar el aire, beber agua, ingerir alimentos o fumar cigarrillos. El contacto de la piel con suelo contaminado por níquel o agua puede también resultar en la exposición al níquel. En pequeñas cantidades el níquel es esencial, pero cuando es tomado en muy altas cantidades este puede ser peligroso para la salud humana (EcuRed, 2015).

La toma de altas cantidades de níquel tiene las siguientes consecuencias:

- Elevadas probabilidades de desarrollar cáncer de pulmón, nariz, laringe y próstata.
- Enfermedades y mareos después de la exposición al gas de níquel.
- Embolia de pulmón.
- Fallos respiratorios.
- Defectos de nacimiento.
- Asma y bronquitis crónica.
- Reacciones alérgicas como son erupciones cutáneas, mayormente de las joyas.

2.8 Fuentes de metales pesados

Los orígenes de estos compuestos tóxicos son muy diversos. Los más relevantes son las operaciones industriales como son las fundiciones metálicas, fábricas y de plantas mineras. Algunas de las industrias que generan aguas residuales contaminadas por metales pesados entre otros contaminantes son: azucarera, petrolera, cervecera, textil, celulosa, papel, acabados metálicos de cobre y sus aleaciones, curtiduría, alimenticias, hierro y acero. Estas fuentes son clasificadas como focos puntuales de contaminación, aunque el escurrimiento de estos complejos es considerado como una fuente difusa (Laubstein, 2010).

2.9 Contaminación por metales pesados

Los metales pesados son elementos metálicos los cuales poseen una densidad superior a $5g/cm^3$ por lo que su peso y su toxicidad están interrelacionados tomando en cuenta a los metaloides como el arsénico que pueden provocar un nivel de toxicidad más bajo de exposición, los metales pesados alcanzan su toxicidad debido al depósito excesivo de estos contaminantes a causa de las actividades humanas, mediante el pasar de los años debido al incremento poblacional se ha tomado énfasis en la preocupación a nivel ecológico y salud humana que se relaciona con la contaminación ambiental (Paredes, 2017).

El impacto ambiental que es más notorio en este tipo de contaminación por metales pesados se basa en las intervenciones antropogénicas como la minería, el sector petrolero, producción industrial y de uso doméstico, una vez que los recursos naturales sufren una contaminación ambiental a causa de metales pesados es muy difícil su remoción (Paredes, 2017).

Existen dos grupos en los cuales se dividen los metales pesados:

- Metales sin función conocida o establecida
- Los oligoelementos o micronutrientes

2.10 Restauración ambiental

Es la práctica de la conservación y restauración ecocéntrica aplicada a las prácticas de manejo eficiente en el ámbito del manejo de ecosistemas, se debe tomar en cuenta es el tipo y la intensidad del daño causado donde se toma en cuenta el nivel de degradación y el rango de restauración (Lindig, 2017).

2.11 Tratamiento Biológico de Aguas Residuales

En el tratamiento biológico debemos tener muy en cuenta los diferentes microorganismos vitales para la transformación de los elementos traza incluyendo los metales pesados que alteran su solubilidad y remediación en el agua, esto hace que los microorganismos modifiquen la concentración de los metales pesados por lo que se toma en cuenta con los mecanismos no enzimáticos y enzimáticos encargados en la remoción de los metales pesados, la remoción de los metales pesados mediante hongos, microalgas y bacterias es de mejor capacidad de remoción que la reportada por procesos físicos-químicos convencionales, mediante las transformaciones enzimáticas en base a los metales en microorganismo se evidencia que la desmetilación, metilación, la

oxidación han dado como resultado agua con presencia de pocos solubles o volátiles (Beltrán & Gómez, 2016).

2.12 Fitorremediación

La fitorremediación es una técnica biológica que se utiliza para la degradación, oxidación y transformación de contaminantes presentes en la depuración de aguas residuales y la descontaminación de suelos debido a capacidad captadoras de especies vegetales, por lo cual engloba métodos que se encargan de asimilar, degradar, metabolizar o detoxificar contaminantes.

La fitorremediación ocurre mediante un proceso natural, por lo que las plantas y microorganismos rizosféricos degradan y captan contaminantes orgánicos e inorgánicos, las plantan también impiden que mediante la lluvia, viento y aguas subterráneas se extienda la contaminación a otras zonas (Arias, 2017).

Existen 6 tipos de fitorremediación el cual se divide en dos grupos:

A) Medios de contención: Rizofiltración, Fitoestabilización, Fitoinmovilización

B) Medios de eliminación: Fitodegradación, Fitoextracción, Fitovolatización

2.13 Ventajas y desventajas de la fitorremediación

A continuación, se detallarán las ventajas y desventajas que posee la técnica de fitorremediación, las mismas que se obtuvieron mediante la búsqueda de información bibliográfica, tomando en cuenta sus principales características basándose en aspectos básicos y fundamentales los mismos que nos darán a conocer sus beneficios y limitaciones.

Tabla 2

Ventajas y desventajas de la fitorremediación

Ventajas	**Desventajas**
1. No se origina un impacto ambiental de gran magnitud. 2. Al usar la fitorremediación de manera adecuada no tiene ningún efecto adverso dentro de la biota del lugar contaminado. 3. Es una técnica de menor costo y más completa que otras tecnologías convencionales (Agamez & Victoria, 2018). 4. Se lo puede hacer de manera in-situ o ex-situ. 5. Se lo puede realizar sin tener que trasladar el sustrato contaminado por lo que disminuye la dispersión de contaminantes por medio del agua	1. Una limitación es la disponibilidad de especies vegetales. 2. Intervalos extensos de tiempo para la degradación. 3. La implementación es de manera específica (Erazo & Andres, 2018). 4. Para poder aplicar el sistema se necesita un lugar de gran extensión 5. No todas las especies de plantas son acumuladoras o tolerantes. 6. La fitorremediación aplicada en el agua puede provocar la diseminación de varias plagas como por ejemplo los mosquitos.

y el aire. 6. Es una técnica sustentable. 7. No demanda personal especializado para el manejo. 8. Esta técnica tiene una mayor aceptabilidad ya que es estéticamente agradable. 9. Evita actividades de excavaciones. 10. Se puede realizar el reciclado de recursos (Biomasa, agua, metales). 11. Se lo puede aplicar en el aire, suelo, agua y sedimentos. 12. Eficiente para los contaminantes inorgánicos y orgánicos. 13. No cuenta con un sistema de consumo de energía.	14. Se aplica solo a ambientes que tengas concentraciones bajas de los contaminantes.

Nota. Análisis de especies vegetales amazónicas para remoción de metales pesados (Cu, Cr, Pb, Ni), en aguas residuales industriales mediante fitorremediación, aplicando análisis envolvente de datos, by Delgadillo, González, Prieto, Villagómez, & Acevedo, (2011)**,** pág. 9. Copyright (2011), Tropical and Subtropical Agroecosystems.

2.14 Tipos de fitorremediación

2.14.1 Rizofiltración

Método por el cual se basa en desarrollar cultivos hidropónicos con alta tasa de crecimiento y área superficial. Posee capacidades para absorber precipitar y concentrar metales pesados de aguas residuales muy contaminadas (Monroy Tovar & Muñoz Arias, 2019).

2.14.2 Fitoestabilización

Es un método que inmoviliza los contaminantes en el suelo a través de la absorción y la acumulación en la raíz por lo cual se deberá seleccionar las especies vegetales que acumulen contaminantes, según la planta se vaya desarrollando cambian y estabilizan el suelo, la fitoestabilización se aplica a grandes extensiones de suelo donde se puede evidenciar una contaminación superficial (Pizarro, 2015).

2.14.3 Fitodegradación

Este método se basa en el uso de especies vegetales para transformar o degradar en sustancias menos toxicas de diversos tipos de contaminantes orgánicos a través de reacciones enzimáticas que se llevan a cabo con los microorganismos rizosféricos es decir el suelo se asocia con las raíces de las plantas donde se captados en sus vacuolas o fijados en las estructuras celulares insolubles como la lignina (Monroy & Muñoz, 2019).

2.14.4 Fitoextracción

Método que implica la absorción de contaminantes por la raíz seguido de la acumulación y traslocación en las partes aéreas, las mismas que pueden captar metales pesados como Cd, Ni, Cu, Zn y Pb, pero, a su vez se puede también utilizar para captar (Se, As) y compuestos orgánicos, en este método se utiliza preferencialmente en plantas hiperacumuladoras (Paredes, 2017).

2.14.5 Fitovolatización

Este método se enfoca en volatilizar contaminantes como (Hg, Se) que se encuentran presentes en el suelo y agua por lo que estos contaminantes son absorbidos, metabolizados y transportados desde la raíz hacia la parte superior de la planta hacia su posterior liberación a la atmósfera de manera más volátil y relativamente menos peligrosas (Monroy & Muñoz, 2019).

2.15 Eficiencia de Fitorremediación

La utilización de especies vegetales macrófitas en el tratamiento de aguas residuales tienen una gran eficacia en la remoción de contaminantes, mediante varios estudios que se han realizado en el tratamiento de aguas residuales han determinado que la planta Jacinto de agua es una planta con gran potencial para la remoción de contaminantes o metales pesados los cuales han determinado que la remoción de metales pesados varía entre 85% hasta 95% de Cadmio, Cromo, Hierro, Zinc y Cobre (Rodriguez & Ivaldi, 2016).

2.16 Sistemas aplicados a la fitorremediación acuática

Para que la fitorremediación tenga una manera más sencilla al momento de su aplicación se debe tomar en cuenta que existen 4 sistemas de fitorremediación acuática las cuales se presentan a continuación:

2.16.1 Humedales artificiales

Los humedales artificiales son áreas que tiene un suelo saturado por agua, el cual se mantienen en comunidad por presencias de organismos vivos los mismos que interactúan mediante una simbiosis y posee 3 tipos de componentes esenciales como:

- Presencia de agua: área que permanece siempre inundada que tiene una profundidad promedio de un metro.
- Suelos: Posee una característica hídrica
- Vegetación: Plantas macrófitas que se adaptan al entorno y a las condiciones hidrológicas (Arias, Betancur, Gómez, Salazar, & Hernández, 2010).

2.16.2 Sistema con plantas acuáticas flotantes

Este sistema adaptado con plantas acuáticas flotantes radica en la interacción que tiene la atmósfera con el agua la que ayuda a que exista un proceso de aireación donde se siembran especies de plantas los cuales tienen por objetivo captar y eliminar distintos contaminantes que están presentes en las aguas residuales a través de su sistema radicular. Las plantas acuáticas también tienen otro propósito y es disminuir la entrada de luz solar al agua ya que esto haría que las algas proliferen de una manera más acelerada, es muy diverso el tipo de utilidad que tiene este sistema ya que a su vez se puede utilizar como un medio de producción de biomasa o proteínas, absorción de contaminantes y no genera lodos. Por lo que este sistema básicamente se basa en la siembra de plantas acuáticas dentro de una área acuosa o laguna la cual a su vez puede combinar varios sistemas como: Humedales superficiales con especies vegetales (plantas emergentes y plantas flotantes), organismos filtradores (moluscos, macroinvertebrados, peces, etc.) y canales con lecho de grava sembrando plantas emergentes (Cruz et al., 2016).

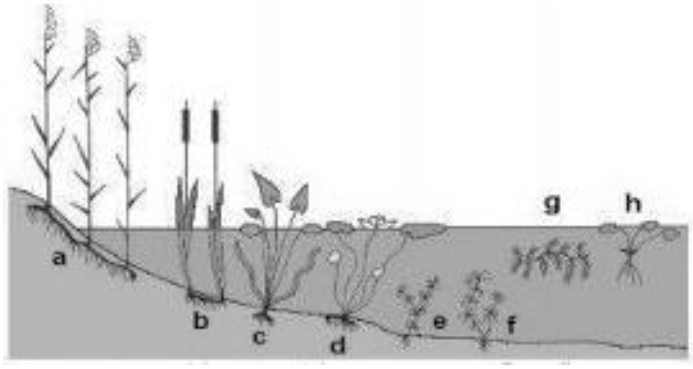


Figura 1. Cultivos acuáticos con plantas flotantes (a, b: plantas palustres o plantas anfibias; c, d: Plantas acuáticas enraizada con hojas flotantes; e, f: plantas acuáticas enraizadas completamente sumergidas; g, h: plantas acuáticas sumergidas, libres y libres flotantes). Tratamiento de las aguas de la laguna "Mansión" mediante la especie *Eichhornia crassipes,* para el riego de áreas verdes en la universidad Peruana Unión, (Cruz et al., 2016).

2.16.3 Sistema de tratamiento integral

Es un método por el cual se integran los sistemas de humedales artificiales y el sistema de implementación de plantas acuáticas flotantes para una mejor captación y eliminación de contaminantes el mismo que remueve eficazmente material sólido y material orgánico, como a su vez se logra reducir una gran cantidad de sales disueltas y nutrientes en exceso (Núñez, Vong, Ortega, & Olguín, 2004).

2.16.4 Plantas acuáticas flotantes

Las plantas acuáticas son aquellas que se caracterizan por crecer bajo el agua. Las plantas son muy variables, desde algas unicelulares hasta organismos complejos en los que cada parte hojas, tallo, flores, etc., han evolucionado para realizar una función que contribuya a la supervivencia. Las plantas acuáticas son aquellas que requieren una gran cantidad de agua en sus raíces para vivir, crecen en medios muy húmedos y completamente inundados, básicamente tienen los mismos requerimientos nutricionales de las plantas terrestres (Poveda, 2014).

Las plantas acuáticas flotantes son aquellas que crecen sobre la superficie del agua (sin sustrato) flotando. Se reproducen con mucha facilidad y en períodos muy cortos, son sensibles al frío y a las heladas, por lo que, en zonas de clima frío, se recomienda tenerlas en un invernadero con una excelente luz y en lo posible sol. Son especies que necesitan de pleno sol o media sombra ligera, por lo general se pueden observar con gran frecuencia en climas tropicales (PyJ, 2011).

2.17 Macrófitas acuáticas

Las macrófitas acuáticas, se refieren a las formas microscópicas de vegetación acuática y comprende las macro algas, las pteridofitos y las verdaderas angiospermas (Wetsel, 1981).

De acuerdo a la forma y fisiología de las macrófitas acuáticas se tiene una clasificación simple y clara:.

- **Plantas flotantes:** Se distinguen por la habilidad para derivar el dióxido de carbono y las necesidades de oxígeno de la atmosfera directamente. Las plantas reciben sus nutrientes y minerales desde el agua, la especie más utilizada en la depuración ha sido el Jacinto de agua.
- **Plantas sumergidas:** Se distinguen por la habilidad para absorber oxígeno, dióxido de carbono y minerales de la columna de agua. Las plantas sumergidas se inhiben fácilmente por la turbiedad alta en el agua porque sus partes fotosintéticas están debajo del agua.
- **Plantas emergentes:** Son las plantas que viven en aguas poco profundas arraigadas en el suelo cuyos tallos y hojas emergen fuera del agua, no sufren limitaciones de agua y tienen mayor acceso a la luz.

2.18 Resistencia de las plantas a metales pesados

Las plantas poseen un mecanismo de resistencia o tolerancia a los metales pesados por lo cual existe diferentes grados de resistencia y sensibilidad como los mecanismos de distribución y amplitud entre las varias especies vegetales como a su vez una gran variedad de ecotipos en una misma especie, tomando en cuenta el grado de complejidad de la resistencia y los modelos del comportamiento de las plantas sobre la toxicidad de los metales, es de manera indicativa por la diversidad de estrategias de protección que se han desarrollado por lo que se destacan prioritariamente dos tipos (Barceló, 1992):

- La planta excluye el metal
- La planta tolera el metal

Hay que tener en cuenta y distinguir la respuesta a largo plazo, la adaptación y corto plazo como la aclimatación.

Según Barceló (1992), se debe tener en cuenta los mecanismos de tolerancia y resistencia:

- Excepción selectiva del metal en el proceso de absorción.
- Excreción del metal.
- Excreción de compuestos por la raíz que en la rizosfera reducen la disponibilidad del metal para la planta.
- Retención del metal en la raíz o en las vías de conducción.
- Inmovilización del metal en la pared celular.
- Inmovilización del metal en las vacuolas.
- Formación por la planta de compuestos secuestrantes e inactivadores de los metales tóxicos.
- Tolerancia a los metales de los sistemas enzimáticos.

2.19 Acumulación de metales pesados en las plantas

De acuerdo Clemens (2002), el proceso de acumulación de metales involucra en general a los siguientes mecanismos:

- Los iones alcanzan la zona de absorción de la raíz por difusión a través de la solución salina del suelo son arrastrados por el movimiento del agua hacia la raíz o entran en contacto con las zonas de absorción a medida que la raíz crece. Los iones

metálicos son movilizados por la secreción de quelantes o por la acidificación de la rizosfera (Clemens, 2002).

- Las raíces capturan los metales hidratados o a los complejos metal – quelante por medio de sistemas de transporte como bombas primarias, canales iónicos y transportadores. Dentro de las células los metales quelados principalmente por fitoquelatinas; el exceso de metales es transportado por la vacuola (Clemens, 2002).
- Los metales se transportan de las raíces a la parte aérea vía la xilema, dentro de él los metales se presentan como iones hidratados o como complejo metal-quelante principalmente con histidina y ácido cítrico como ligantes (Clemens, 2002).
- Después de penetrar el apoplasto de las hojas, los metales se distribuyen dentro de la célula, manteniendo cada organelo las concentraciones dentro de rangos fisiológicos específicos. El exceso de metales esenciales y no esenciales (como Pb y Ni) se almacena en las vacuolas (Clemens, 2002).

Según Wang (1996), la acumulación de metales por los organismos acuáticos se presentan en un proceso que consiste en dos pasos: un primer paso de absorción rápida o vinculación a la superficie biológica (biosorción), seguido por un segundo paso de transporte lento e irreversible, controlado por difusión al interior de la célula (bioacumulación), que pueda ser por difusión del ion metálica a través de la membrana celular o por transporte activó por una proteína transportadora.

En las plantas, los efectos de los metales empiezan en la raíz debido a que estos son los organismos responsables de absorber los nutrientes que le proporciona el medio y afecta de manera sucesiva al resto de la planta. En las hojas principalmente se producen graves daños en los cloroplastos y las mitocondrias lo que altera los procesos de fotosíntesis y respiración. En una fase más avanzada de alteración se producen intensos cambios metabólicos y de regulación celular por lo cual ocurre finalmente un estímulo de acumulación crónica del metal pesado lo que puede llevar al deterioro de la planta y la muerte de la misma.

2.20 El análisis envolvente de datos DEA

Para medir la eficiencia se utiliza dos enfoques, la programación econométrica y la programación matemática, el Análisis Envolvente de Datos (DEA) es el más utilizado dentro del enfoque matemático y es un método no paramétrico que tiene la ventaja de que no impone una forma funcional de la función de producción (Rios & Shively, 2005). En la construcción del modelo DEA, no se establece una función de producción

ideal, son los propios datos disponibles los que determinan la forma y localización de la verdadera frontera de eficiencia. El Análisis Envolvente de Datos plantea un problema de programación matemática para cada unidad observada o Decision Making Unit (DMU), cuya resolución permite asignarle un índice de eficiencia.

Por consiguiente, el objetivo del análisis DEA es obtener una medida sintética de eficiencia relativa, en la que distintas unidades de toma de decisiones (DMU) se analizan en relación a otras unidades de similares características. Para ofrecer las medidas de eficiencia la técnica DEA se basa en el concepto de eficiencia de Pareto ampliando la tradicional ratio output (salida) / input (entrada) a un ratio ponderado que puede utilizar varios inputs y outputs que se trataría de maximizar (Madueño, Jorge, & Gardey, 2012).

DEA es un método más completo que las ratios de rentabilidad. Estos métodos no paramétricos son capaces de procesar información de varios outputs y varios inputs y proporcionar medidas de eficiencias relativas y sintéticas. Mediante técnicas de programación matemática, la eficiencia de cada DMU se determina como la distancia a la frontera de producción dada por un conjunto de datos con tecnologías homogéneas, es decir, comparando las realizaciones de cada unidad con los resultados de las mejores. Estas últimas son las que conforman la frontera de producción (Alarcón & Sánchez, 2013).

La formulación estándar de este programa puede adoptar varias formas en función de que se opte por una orientación de minimización de input o la maximización de output, se presenta como un programa fraccional, lineal o dual. Sin embargo, todas ellas comparten el mismo enfoque, la eficiencia de cada unidad depende de la capacidad de cada DMU para mejorar sus resultados o reducir el consumo de recursos, estando sujetos a unas restricciones que reflejan la actividad del resto de productores (Cordero, 2006).

La manera más intuitiva de aproximarse a la idea que subyace en esta técnica es a través de su programa fraccional, en el que se plantea un problema de maximización o minimización (según la orientación) de un ratio de productividad total para cada unidad evaluada.

Fórmula 1. Productividad total

$$\text{Max} \quad h_0(u,v) = \sum_{r=1}^{S} u_r . y_{r0} \,/\, \sum_{i=1}^{m} v_i x_{i0}$$

$$s.a. \quad \left(\sum_{r=1}^{s} U_r Y_{r0}\right) / \left(\sum_{i=1}^{m} v_i X_{i0}\right) \leq 0$$

$$\boldsymbol{J = 1,\ldots\ldots, n \quad r = 1,\ldots\ldots, s \quad i = 1,\ldots\ldots, m}$$

Donde h_0 es la medida de la eficiencia de la unidad 0, y_{r0} es la cantidad del output r producido por la unidad evaluada; y_{rj}, x_{ij} son los outputs e inputs de la unidad j y v_i, $u_r \geq 0$ son los pesos variables o ponderaciones virtuales determinados por la solución del problema.

No obstante, en la práctica, el cálculo de los índices de eficiencia resulta más sencillo si se utiliza la forma dual de este programa, a través de la cual se construye una aproximación lineal por tramos la verdadera frontera de producción. La formulación dual es la siguiente:

Fórmula 2. Índices de eficiencia

$$Max \quad \theta_0$$

$$s.a. \quad \sum_{j=1}^{n} \lambda_j X_{r\,j} \geq \theta Y_{r\,0}$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j X_{i\,j} \leq X_{i\,0}$$

$$\lambda_j \geq 0$$

$$\boldsymbol{J = 1,\ldots\ldots, n \quad r = 1,\ldots\ldots, s \quad i = 1,\ldots\ldots, m}$$

En este caso, si θ = 1, la unidad evaluada se considera eficiente, pues no existe otra que produzca más o que consiga el mismo nivel de producción con menores recursos que ella, corresponde al modelo de la eficiencia de rendimiento constante a escala (CRS), que será la eficiencia técnica (TE).

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

A continuación, se describe el diseño de investigación, el mismo que permitirá alcanzar los objetivos planteados y poder obtener la información necesaria que ayude al desarrollo de nuestro proyecto de investigación.

3.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación que se va aplicar es de tipo cualitativo en el cual se realizó un análisis donde se profundizaron datos relevantes y técnicas que ayuden a

contar con una riqueza interpretativa y se pueda identificar la eficacia de la captación de los metales pesados con respecto a la fitorremediación.

La investigación analítica implicará en obtener conocimientos o soluciones a problemas de carácter científico, al mismo tiempo nos ayudará a conocer el tipo de plantas con mayor concentración de metales pesados empleando la fitorremediación

Mediante la investigación descriptiva se dará a conocer la morfología y el tipo de especies vegetales que se van a emplear en la fitorremediación para lo cual se podrá identificar qué tipos de contaminantes son capaces de absorber y el tipo de técnica de fitorremediación que se va a emplear para el uso eficaz de la planta.

3.2 Métodos de investigación

Para que el presente proyecto tenga relevancia en su estudio se aplicaron métodos que delimitaron la metodología, en dependencia del estudio realizado.

Recopilación de información: Mediante la investigación bibliográfica se define que se recopilará artículos científicos por estudiante para lo cual se tomó en cuenta parámetros como el tiempo de crecimiento de la planta, la cantidad de la captación de contaminante por planta, especies vegetales endémicas o con adaptabilidad en el ecosistema amazónico.

Método documental: se obtuvieron datos precisos mediante la revisión bibliográfica que se obtendrá de repositorios universitarios proyectos ya realizados de manera nacional e internacional, ensayos y artículos científicos, enfocados a reconocer los componentes o agentes contaminantes que permitan indagar en busca de una conclusión mediante la utilización de especies vegetales que sean óptimas para la remoción de contaminantes presentes en las aguas residuales industriales.

El Análisis envolvente de datos: es una técnica no-paramétrica, determinista que recurre a la programación matemática, mediante este método se podrá realizar un análisis comparativo de sistematización de datos (Jaime & Luque, 2016).

Sistematización de datos: una vez obtenidos los datos que se recopilaron de las especies vegetales que se ocuparan para el proceso de fitorremediación en dependencia de su captación se la clasificaran de la planta más eficiente hasta la que menos captación de contaminantes tenga.

Para alcanzar los objetivos se tomará en cuenta las características esenciales de cada planta que se han empleado en la fitorremediación para potencializar el uso de especies vegetales que sean óptimas para absorber concentraciones de metales pesados.

Para alcanzar nuestro enfoque se utilizará la normativa ambiental vigente la cual determina los criterios de calidad de aguas para la preservación de flora y fauna en aguas dulces frías o cálidas, y en aguas marinas y de estuarios.

Para el uso de este método basado en la fitorremediación no se contará con un tratamiento previo ya que se busca optimizar costos y recursos, por lo cual se va a emplear especies vegetales que sean óptimas en adaptabilidad y captación de los contaminantes.

Para la obtención de información que se utilizará para realizar este informe se definirá a partir de estudios que se han realizados a partir del año 2015 al 2020 mismo que serán obtenidos de repositorios de distintas universidades y artículos científicos.

3.3 Aplicación del análisis envolvente de datos

El presente trabajo de investigación se hizo con la finalidad de realizar un análisis comparativo de especies vegetales de la Amazonía ecuatoriana mediante casos de Fitorremediación. En el cual mediante la recolección de información se tomaron especies vegetales de interés de estudio tales como: Trébol de agua (*Limnobium laevigatum*), Azolla (*Azolla filiculoides*), Salvinia (*Salvinia natans)*, Junco (*Schoenoplectus californicus)*, Buchón de agua *(Limnocharis flava)*, Lechuga de agua (*Pistia stratiotes*), Flecha de agua (*Sagittaria montevidensis*), Hydrilla (*Hydrilla verticillata*) y Totora (*Typha latifolia*), de esta forma se planteó una alternativa para la aplicación del análisis envolvente de datos (DEA).

Este modelo se lo planteo a partir de la recolección de datos adquiridos mediante la revisión y búsqueda bibliográfica de diferentes proyectos o casos de fitorremediación, donde se encontraron las especies de interés de estudio. Este análisis comparativo se basó en la evaluación de las especies vegetales utilizadas en procesos de fitorremediación, para conocer y obtener la eficiencia de remoción de MP (metales pesados) a través de las plantas en estudio.

A partir de la información recopilada se utilizó la metodología del Análisis envolvente de datos (DEA) enfocado en las entradas definiéndolos como DMU a cada una de las especies. De tal forma se especificaron las entradas y salidas a analizar, las mismas que se encuentran en la Tabla 12.

Tomando en cuenta la información descrita a continuación se presenta la primera parte del modelo que corresponde a CRS orientada a las entradas, donde se definieron las condiciones de función para cada DMU mediante la aplicación del programa matemática MAXDEA la misma que se encuentra adjunta en los anexos.

Dentro del método DEA se estimó el valor máximo de output que puede alcanzarse en proporción a los inputs según las unidades más eficientes. El modelo tipo frontera se utilizó en este estudio al ser de mayor aceptación por parte de la comunidad investigadora, pues se adapta mejor a la idea de comparar el comportamiento de unas unidades (ineficientes) con el de las que alcanzan la máxima producción (situadas en la frontera), determinando así los niveles de eficiencia en base a la concentración inicial y final del contaminante. Considerando que 1 es la frontera de eficiencia absoluta y aquellas especies con valores menores a 0.90 serán consideradas medianamente eficientes.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1 Inventario de plantas utilizadas para la fitorremediación de metales pesados

A través de la búsqueda de información obtenida en repositorios universitarios, proyectos ya realizados, páginas confiables como tropicos.org y artículos científicos, se pudo recaudar información en base a las plantas de interés de estudio, tomando en cuenta sus capacidades para su desarrollo dentro de los climas tropicales y subtropicales los cuales comúnmente se presentan en la Amazonía ecuatoriana. Una vez identificadas las plantas se procedió a la recolección de información de acuerdo a las características que poseen cada una de las especies y su potencial para acumular y metabolizar metales pesados (MP) los mismos que se encuentran detallados a continuación.

Tabla 3

Especie vegetal acuática trébol de agua

Limnobium laevigatum (Heine, 1968)**.**

Figura 2. Fotografía de la especie. Tomado de "Flor de planta: Plantas acuáticas de crecimiento rápido," por el Proyecto de Análisis de Especies Vegetales Amazónicas para Remoción de Metales Pesados (Cu, Cr, Pb, Ni), en Aguas Residuales Industriales Mediante Fito-rremediación, Aplicando Análisis Envolvente de Datos. Recuperado de https://www.flordeplanta.com.ar/acuaticas/plantas-acuaticas-de-crecimiento-rapido-la-limnobium-laevigatum/

Parámetros	Resultado		Fuente
Taxonomía	**Sistema de la planta**	Acuática	(Valderrama, 1996)
	Reino	*Plantae*	
	División	Angiospermae	
	Clase	*Monocotyledoneae*	
	Orden	*Alismatales*	
	Familia	*Hydrocharitaceae*	
	Género	*Limnobium*	
Descripción de la planta	EL trébol de agua es una planta tropical flotante nativa de Centro América. Se caracteriza por poseer hojas con forma levemente acorazonada, las cuales se encuentran unidas entre ellas en forma concéntrica por un pequeño tallo. Posee un tamaño entre 5 y 15 cm, sus hojas oscilan entre los 2 a 5 cm si se encuentran bien iluminadas y una temperatura promedio de 18º a 29ºC.		(Valderrama, 1996)
Condiciones de hábitat	Esta especie se caracteriza por su fácil crecimiento debido a que no posee necesidades especiales. Resiste altas temperaturas la cual la hace adecuada para cualquier tipo de ambiente. No gusta de las corrientes rápidas. Tiene capacidades de rápido crecimiento y se puede multiplicar de manera sencilla. Se recomienda tener un adecuado control porque tiende a cubrir toda la superficie de agua evitando el paso de luz para plantas subyacentes.		
Reproducción	El trébol de agua posee una reproducción por semillas y por estolones, esta es la manera más común de propagación. Tiene 2 tipos de reproducción: a) sexual por medio de flores y semillas, b) clonal, por producción de nuevos organismos que forman parte de la planta madre hasta su separación.		
Fase de adaptación	Para que la especie tenga un adecuado crecimiento el pH neutro 7 sería el ideal, aunque también resiste una amplia gama de pH que oscila entre 4,5 ácido a 9 alcalino.		
Porcentaje de remoción	Esta especie posee una gran capacidad remediadora la cual capta metales pesados en cantidades como: Pb= 290 mg/kg, Cr= 200mg/ kg y Ni= 245 mg/ kg		(D. Arán, Harguinteguy, Cirelli, & Pignata, 2016)
Tiempo de captación del contaminante	Se pudo determinar que el tiempo de depuración de contaminantes varía en las condiciones del agua, pero se estima que está entre los 21 días desde el día de su exposición.		(Burgos, 2018)
Eficiencia de remoción	Los porcentajes de remoción varían en dependencia de las condiciones del sitio, pero se tiene un estimado de un 93% en remoción de metales y un 96% en aguas residuales.		(Burgos, 2018)

Tabla 4

Especie vegetal acuática Azolla

Azolla filiculoides (J. Lamark, 1783)**.**			
 Figura 3. Fotografía de la especie. Tomado de "JardineriaOn: Helecho mosquito," por el Proyecto de Análisis de Especies Vegetales Amazónicas para Remoción de Metales Pesados (Cu, Cr, Pb, Ni), en Aguas Residuales Industriales Mediante Fitorremediación, Aplicando Análisis Envolvente de Datos. Recuperado de https://www.jardineriaon.com/helecho-de-agua-azolla-filiculoides.html			
Parámetros	**Resultado**		**Fuente**
Taxonomía	**Sistema de la planta**	Acuática	(Pisfil & Barbosa, 2015)
	Reino	*Plantae*	
	División	*Pteridophyta*	
	Clase	*Pteridopsida*	
	Orden	*Salviniales*	
	Familia	Azollaceae	
	Género	*Azolla*	
Descripción de la planta	La Azolla es una especie nativa de las regiones tropicales y templadas de América, se lo denomina Helecho mosquito debido a su gran capacidad de ocupar los cuerpos cubriéndolos por completo evitando el paso de otros organismos. Poseen escamas bilobuladas sobrepuestas como hojas y tienen sus raíces colgando hacia abajo dentro del agua.		(Pisfil & Barbosa, 2015)
Condiciones de hábitat	La Azolla se caracteriza por poseer un crecimiento rápido, puede soportar temperaturas que van desde los 0°C hasta los 35°C. Se debe mantener en un espacio siempre húmedo, porque esta no soporta condiciones de resequedad o falta de agua. No presenta ningún inconveniente en referencia a iluminación por lo que es adecuado para adaptarse en zonas con poca disponibilidad de luz.		(Poveda, 2014)
Reproducción	La Azolla tiene la capacidad de duplicar su peso cada 17 días, durante un lapso de 3 meses que es su ciclo de vida en dependencia de las condiciones ambientales. Se reproducen mediante esporas como es común de los helechos y por división espontánea de las plantas adultas las cuales y sueltan sus propias raíces convirtiéndolo en una nueva planta.		(Poveda, 2014)
Fase de adaptación	Para que la planta logre su proceso de adaptación y pueda alcanzar un estado óptimo se necesita de condiciones favorables de pH, las cuales están entre 6 y 7 pH neutro siendo los más		(Poveda, 2014)

	adecuados. Puede soportar condiciones de pH ácido y alcalino que oscilan entre 4-9.	
Porcentaje de remoción	La Azolla es una especie capaz de captar grandes concentraciones de metales pesados, la cual se acumula principalmente en sus raíces. Esta planta puede llegar absorber metales como: Cr= 77 mg/kg, Pb= 42-90 mg/kg, Ni= 85mg/kg, Cu= 22mg/kg	(Caviedes et al., 2016)
Tiempo de captación del contaminante	Esta especie tiene un tiempo de captación de 8 días una vez expuesta al contaminante, esta empieza a extraer y acumular los metales mediante el aumento de su biomasa.	(Pisfil & Barbosa, 2015)
Eficiencia de remoción	La Azolla según estudios realizados con anterioridad esta presenta una eficiencia de remoción de hasta el 93% en dependencia de las condiciones área de estudio.	(Pisfil & Barbosa, 2015)

Tabla 5

Especie vegetal acuática salvinia

Salvinia natans (Allioni, 1785)**.**		
 Figura 4. Fotografía de la especie. Tomado de "AquaFood: *Salvinia natans*," por el Proyecto de Análisis de Especies Vegetales Amazónicas para Remoción de Metales Pesados (Cu, Cr, Pb, Ni), en Aguas Residuales Industriales Mediante Fito-rremediación, Aplicando Análisis Envolvente de Datos. Recuperado de https://www.aquafood.co.uk/product/salvinia-natans/		
Parámetros	**Resultado**	**Fuente**
Taxonomía	**Sistema de la planta**: Acuática **Reino**: *Plantae* **División**: *Pteridophyta* **Clase**: *Polypodiopsida* **Orden**: *Salviniales* **Familia**: Salviniaceae **Género**: *Salvinia*	(EcuRed, 2011)
Descripción de la planta	La *Salvinia natans* es considerada un helecho acuático que posee características de flotación libre, posee tallos delgados y sus hojas se encuentran en un grupo de tres, dos sumergidas y una flotante. El tamaño de sus hojas varía con la madurez de la planta. Sus tallos se encuentran sumergidos poseen coloración verde y con pelos finos.	(DAFF, 2015)
Condiciones de hábitat	Igual que otras plantas flotantes no prefieren corrientes rápidas. Esta planta puede soportar temperaturas en un rango	(Carrillo, 2017)

	de 22°C a 43°C, aunque las bajas temperaturas suelen reducir su crecimiento, es considerada una hierba mala de agua dulce, esta posee la capacidad de reproducción rápida y se debe mantener un control de la misma.	
Reproducción	Esta planta tiene la capacidad de crecer a gran velocidad, ya sea de un desprendimiento de fragmento vegetal, esta puede llegar a doblar su población en cuestión de pocos días, por lo cual suelen obstruir el paso de la luz al cuerpo de agua. Se multiplican por medio de estolones. Se pueden reproducir de forma sexual y asexual.	(Mayland, 1990)
Fase de adaptación	Para que la planta se desarrolle en un estado óptimo, las condiciones favorables estarían entre un pH ligeramente ácido y alcalino, aunque también poseen condiciones de soportar un pH moderadamente acido entre 3-4 y ligeramente acido entre 8-9.	(Flores & Cortez, 2006)
Porcentaje de remoción	La Salvinia posee la capacidad de captar concentraciones altas de metales pesados, debido a eso se la considera una de las especies con un enorme potencial para remediador, absorbiendo cantidades de Cr= 45mg/kg, Pb= 50-66mg/kg, Ni= 90mg/kg, Cu= 90mg/kg	(Caviedes et al., 2016)
Tiempo de captación del contaminante	El tiempo de depuración del contaminante se realiza a los 10 días desde su exposición la cual acumula el metal en las raíces y hojas para proceder a su extracción.	(Flores & Cortez, 2006)
Eficiencia de remoción	El rendimiento promedio de captación y remoción de metales están entre un 95% de efectividad, en dependencia de los metales que se encuentren en la zona de estudio.	(Flores & Cortez, 2006)

Tabla 6

Especie vegetal acuática junco

Schoenoplectus californicus (Soják, 1972)**.**


Figura 5. Fotografía de la especie.

Tomado de "Flora Bonaerense: Junco de laguna," por el proyecto de Análisis de Especies Vegetales Amazónicas para Remoción de Metales Pesados (Cu, Cr, Pb, Ni), en Aguas Residuales Industriales Mediante Fito-rremediación, Aplicando Análisis Envolvente de Datos. Recuperado de https://florabonaerense.blogspot.com/2017/06/junco-de-laguna-schoenoplectus.html

Parámetros	Resultado		Fuente
Taxonomía	**Sistema de la planta**	Acuática	(EcuRed, 2014)
	Reino	*Plantae*	
	División	*Magnoliophyta*	
	Clase	*Liliopsida*	
	Orden	*Ciperales*	
	Familia	Cyperaceae	
	Género	*Schoenoplectus*	
Descripción de la planta	La *Schoenoplectus californicus* o junco de agua, es una herbácea perenne acuática, la cual es muy común en esteros y zonas pantanosas de Sudamérica. A comienzos del verano esta desarrolla un mayor crecimiento, sus tallos pueden llegar a medir entre 1 a 3 metros de altura. Sus hojas superiores presentan vainas foliares las cuales a menudo desarrollan laminas algo que no sucede con las de la parte inferior. Estas se desarrollan en aguas con más de 1m de profundidad.		(Bedoya, 2013)
Condiciones de hábitat	Es una planta que aprovecha las condiciones de lugar para su óptimo para su desarrollo. Se caracteriza por ser una especie de clima templado tropical la cual prospera de mejor manera en zonas soleadas, toleran rangos de temperatura que van desde los 16 ºC a 27 ºC. Esta se desarrolla en suelos inundados de manera permanente o temporal la cual es muy común en ambientes dulceacuícolas.		(Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010)
Reproducción	El Junco, es una especie la cual se reproduce de manera vegetativa. Su reproducción mediante el florecimiento de semillas es escasa debido a que comúnmente no logran germinar. La reproducción vegetativa se desarrolla mediante propágulos vegetativos esto quiere decir mediante la utilización de células especializadas para propagar la planta (meristemos).		
Fase de adaptación	Esta es una especie con un gran margen de adaptabilidad, por lo cual se la constituye una especie dominante en lugares donde es restringido el desarrollo de otras plantas. Necesita un pH neutro para que crecer en condiciones favorables, pero también tolera pH en un rango de que oscila entre 4-9.		
Porcentaje de remoción	Esta especie puede absorber los contaminantes en un rango de 0.3818 hasta 0,6130 ppm la cual se acumulará en la raíz de la planta, también posee características de absorción de metales tales como: Pb, Ni, Cd, As, Cr y Hg.		(Ayala, 2018)
Tiempo de captación del contaminante	El tiempo de captación del contaminante se realiza a los 7 días desde su exposición la cual acumula el metal en las raíces y hojas durante 14 días listas para ser removidas.		(Delgadillo et al., 2010)
Eficiencia de remoción	El rendimiento promedio de captación y remoción de metales varia en dependencia del lugar de estudio, pero se encuentra entre un 85% de eficiencia.		

Tabla 7

Especie vegetal acuática buchón de agua

<table>
<tr><th colspan="3">Limnocharis flava (F. Buchenau, 1868).</th></tr>
<tr><td colspan="3">
Figura 6. Fotografía de la especie.
Tomado de “Plantas tropicales útiles: Limnocharis flava,” por el Proyecto de Análisis de Especies Vegetales Amazónicas para Remoción de Metales Pesados (Cu, Cr, Pb, Ni), en Aguas Residuales Industriales Mediante Fito-rremediación, Aplicando Análisis Envolvente de Datos. Recuperado de http://tropical.theferns.info/viewtropical.php?id=Limnocharis+flava</td></tr>
<tr><th>Parámetros</th><th colspan="2">Resultado</th><th>Fuente</th></tr>
<tr><td rowspan="7">Taxonomía</td><td>Sistema de la planta</td><td>Acuática</td><td rowspan="7">(Biología, 2008)</td></tr>
<tr><td>Reino</td><td>Plantae</td></tr>
<tr><td>División</td><td>Magnoliophyta</td></tr>
<tr><td>Clase</td><td>Liliopsida</td></tr>
<tr><td>Orden</td><td>Alismatales</td></tr>
<tr><td>Familia</td><td>Limnocharitaceae</td></tr>
<tr><td>Género</td><td>Limoncharis</td></tr>
<tr><td>Descripción de la planta</td><td colspan="2">Limnocharis flava es una planta acuática muy común de las zonas pantanosas. Es considerada una hierba perenne o anual, son enraizadas y emergentes. Posee hojas que miden entre 6.5 cm a 29cm, las cuales tienen forma ovada. Puede llegar a medir hasta 40 cm.</td><td rowspan="2">(Muños, 2010)</td></tr>
<tr><td>Condiciones de hábitat</td><td colspan="2">Es una planta muy atractiva de tipo palustre, las cuales se caracterizan por desarrollarse en lugares anegados o llenos de agua, se dan principalmente en zonas tropicales por lo que puede soportar temperaturas de 14°C hasta los 29°C. Se la puede encontrar en marismas, lagunas, ríos y zanjas.</td></tr>
<tr><td>Reproducción</td><td colspan="2">El buchón de agua es una especie que puede reproducirse de manera vegetativa, por lo que en algunos casos prolifera en grandes cantidades por lo que puede convertirse en una plaga. En ocasiones sus semillas caen a aguas poco profundas y germinan.</td><td>(Violeta, 2012)</td></tr>
<tr><td>Fase de adaptación</td><td colspan="2">Esta es una planta que se caracteriza por tener cualidades que le permiten adaptar su estructura reproductiva y vegetativa para sobrevivir en diferentes cuerpos de aguas, además posee una adaptabilidad de pH que oscila entre 4-10.</td><td>(Muños, 2010)</td></tr>
<tr><td>Porcentaje de remoción</td><td colspan="2">El Buchón tiene la capacidad de captar metales pesados en cantidades como: Pb 6,4mg/kg, Cr= 8,89 mg/kg, Cu= 7,6mg/kg y Ni= 2,9mg/kg.</td><td>(Syukor, Sulaiman, Siddique, Zularisam, &</td></tr>
</table>

		Said, 2016)
Tiempo de captación del contaminante	El tiempo de captación del contaminante se realiza después de los 10 días expuestos al contaminante el cual es captado por las raíces, hojas y tallo de la planta utilizada.	(Muños, 2010)
Eficiencia de remoción	Esta tiene una eficiencia de remoción de un 95% en Solidos totales y en remoción de metales pesados hasta un 90% en dependencia del área de estudio.	

Tabla 8

Especie vegetal acuática lentejas de agua

Lemna minor (Linneo, 1753a)**.**		
 Figura 7. Fotografía de la especie. Tomado de "Plantas de Acuario: Lenteja de agua," por el Proyecto Análisis de Especies Vegetales Amazónicas para Remoción de Metales Pesados (Cu, Cr, Pb, Ni), en Aguas Residuales Industriales Mediante Fito-rremediación, Aplicando Análisis Envolvente de Datos. Recuperado por https://plantasdeacuario.org/%F0%9F%8C%B1-lenteja-de-agua/		
Parámetros	**Resultado**	**Fuente**
Taxonomía	**Sistema de la planta**: Acuática **Reino**: *Plantae* **División**: *Faberogamas magnoliophyta* **Clase**: *Liliopsida* **Orden**: *Alismatales* **Familia**: *Areceae* **Género**: *Lemna*	(Vélez & Anderson, 2017)
Descripción de la planta	*Lemna minor* o también conocida como lenteja de agua es una planta acuática flotante la cual cuenta con una estructura simple con una tasa de crecimiento alta a nivel del mundo, su forma principal se lo conoce como fronda y si tamaño esta entre 2cm a 0.1 cm de diámetro.	(Jaramillo Jumbo & Flores Campoverde, 2012)
Condiciones de habitad	Esta planta tiene un crecimiento demasiado rápido por lo que si no es controlada de una buena manera se puede convertir en una plaga, para que la planta se desarrolle necesitan por lo menos 12 horas de luz al día, la temperatura promedio que se necesita para que esta planta puedo proliferar varía entre 15º C a 25º C	(Vélez & Anderson, 2017)
Reproducción	La reproducción de *Lemna minor* es de manera asexual y está entre 0.1 y 0.5 dia^{-1}, en optimas condiciones para agrandar su biomasa.	(Jaramillo Jumbo & Flores Campoverde,

Fase de adaptación	Para que la planta tenga un óptimo crecimiento no debe estar expuesto a un pH acido ya que esto hace que se marchiten, porque durante los 3 primeros días de adaptación mantiene un rango entre 4,5 a 7,5 de pH, con una conductividad que vería en un rango entre 269 a 410 µs.	2012
Porcentaje de remoción	*Lemna minor* capta contaminantes como 4.27g Se/Kg, 13.3g Cd/Kg y 3.33g Cu/kg, como a su depura 2.82g Cr/kg, y de muy baja captación de 0.63g Pb/Kg y 1.71g Ni/kg.	(Arroyave, 2004)
Tiempo de captación del contaminante	En la base de absorción la planta puede captar los contaminantes con una depuración de 14 días.	(Ponce & Rodrigo, 2016)
Eficiencia de remoción	Se ha demostrado que *Lemna minor* tiene una eficiencia de remoción del 97% de metales pesados y un 98% en solidos disueltos.	(Arroyave, 2004

Tabla 9

Especie vegetal acuática lechuga de agua

Pistia stratiotes (Lineo, 1753)**.**			
 Figura 8. Fotografía de la especie. Tomado de "Flores y plantas: *Pistia Stratiotes*," por el Proyecto de Análisis de Especies Vegetales Amazónicas para Remoción de Metales Pesados (Cu, Cr, Pb, Ni), en Aguas Residuales Industriales Mediante Fito-rremediación, Aplicando Análisis Envolvente de Datos. Recuperado de https://www.floresyplantas.net/pistia-stratiotes/			
Parámetros	**Resultado**		**Fuente**
Taxonomía	**Sistema de la planta**	Acuática	(Mendoza et al., 2018)
	Reino	*Plantae*	
	División	*Magnoliophyta*	
	Clase	*Liliopsida*	
	Orden	*Alismatales*	
	Familia	*Araceae*	
	Género	*Pistia*	
Descripción de la planta	La planta *Pistia stratiotes* se la caracteriza por tener una forma de roseta con hojas de color verde las cuales púen llegar a medir 40cm, las hojas están cubiertas por tricomas.		(M. Robles, 2013)
Condiciones de habitad	Para un óptimo desarrollo de la plata se debe tener un clima que varía entre 17º C a 30º C por lo que se debe evitar que no baje de la temperatura de 15º C ya que esto paraliza el crecimiento y		(Floresyplantas.net, 2017)

	desarrollo de la planta.	
Reproducción	La reproducción de esta planta es de manera asexual y rápida ya que brotan sus semillas cada 10 o 12 días por lo cual se debe tener en cuenta puede volverse una planta invasora.	
Fase de adaptación	El rango en el cual la planta puede adaptarse es mediante su pH por lo que se estima que debe estar en un rango promedio de 5.5 y 7.5 pH y una iluminación continua y persistente.	
Porcentaje de remoción:	Los contaminantes que la planta depura son 1600mgCr/kg, 1000mgCu/Kg, 5.2mg Ni/kg, 1430mg As/Kg.	(Caviedes Rubio, Delgado, & Olaya Amaya, 2016)
Tiempo de captación del contaminante	Para que la planta *Pistia stratiotes* tenga una óptima depuración el tiempo mínimo es de 9 días.	(M. Robles, 2013)
Eficiencia de remoción	La planta *Pistia stratiotes,* tiene una remoción del 80% en aguas residuales.	(Caviedes Rubio et al., 2016)

Tabla 10

Especie vegetal acuática hydrilla

Hydrilla verticillata (Royle, 1839)**.**		
 Figura 9. Fotografía de la especie. Tomado de "Aquaplantas: *Hydrilla Verticillata*," por el Proyecto de Análisis de Especies Vegetales Amazónicas para Remoción de Metales Pesados (Cu, Cr, Pb, Ni), en Aguas Residuales Industriales Mediante Fito-rremediación, Aplicando Análisis Envolvente de Datos. Recuperado de https://aquaplantasmx.com/products/hydrilla-verticillata-x6		
Parámetros	**Resultado**	**Fuente**
Taxonomía	**Sistema de la planta** Acuática **Reino** *Plantae* **División** *Magnoliophyta* **Clase** *Liliopsida* **Orden** *Alismatales* **Familia** *Hydrocharitacea* **Género** *Hydrilla*	(Robles & Madsen, 2015)
Descripción de la planta	La planta *Hydrilla verticillata* presenta una forma muy característica en forma de roseta con hojas de color verde, puede llegar a medir de 20 a 100 cm de altura y presenta espinas en la vena central se la conoce también como una	(Paiz, 2007)

	planta altamente invasora.	
Condiciones de habitad	*Hydrilla verticillata* es una planta que se puede adaptar en casi todos los climas ya que su temperatura en el que puede desarrollarse varía entre 4º C a 30º C.	
Reproducción	La planta se reproduce de manera asexual y sexual por lo que de manera asexual provoca mayor propagación.	
Fase de adaptación	La *Hydrilla verticillata* es una de las plantas con mayor rango de adaptabilidad por lo que varía entre 5 a 9 de pH.	
Porcentaje de remoción:	Mediante la planta *Hydrilla verticillata* logro depurar Pb (3846,52 mg kg−1) y Ni (2096,74 mg kg−1)	(Zhang, Zhang, Li, Chen, & An, 2020)
Tiempo de captación del contaminante	El tiempo para que esta planta tenga un optima depuración 14 días	(Sobrero, 2010)
Eficiencia de remoción	Mediante *Hydrilla verticillata* se tiene una depuración eficiente de 75%.	

Tabla 11

Especie vegetal acuática totora

Typha latifolia (Linneo, 1753)**.**			
 Figura 10. Fotografía de la especie. Tomado de "Naturalista: *Typha latifolia*," por el proyecto Análisis de Especies Vegetales Amazónicas para Remoción de Metales Pesados (Cu, Cr, Pb, Ni), en Aguas Residuales Industriales Mediante Fito-rremediación, Aplicando Análisis Envolvente de Datos. Recuperado de https://colombia.inaturalist.org/taxa/48685-Typha-latifolia			
Parámetros	**Resultado**		**Fuente**
Taxonomía	**Sistema de la planta**	Acuática	(Naturalista, 2016)
	Reino	*Plantae*	
	División	*Magnoliophyta*	
	Clase	*Liliopsida*	
	Orden	*Poales*	
	Familia	*Typhaceae*	
	Género	*Typha*	

Descripción de la planta	*Typha latifolia* es una planta herbácea ya que están envainadas unas con otras, por lo que las hojas presentan una forma de limbo en una proporción extendida y plana, puede llegar a alcanzar 2 metros de altura.	(Benavides & Méndez, 2020)
Condiciones de habitad	Esta planta puede estar en una temperatura que varía entre 5º C a 25º C.	
Reproducción	Esta planta se reproduce por medio de la multiplicación y división de ribosomas una vez que las flores se marchitan.	
Fase de adaptación	Para su adaptabilidad es se debe tener un pH mínimo de 5 a 9.2 de pH y tolera un nivel de salinidad de 1.13%.	
Porcentaje de remoción: <	*Typha latifolia* puede llegar a depurar 0.8 mg Pb/kg, 0.08mg Cd/Kg, 13.1 mg Cr/Kg, 7.1 mg Fe/Kg, 28 mg Cu/ kg 297 mg Ni /kg.	(Carranza et al., 2008)
Tiempo de captación del contaminante	El tiempo para que esta planta tenga una óptima depuración en 6 días.	
Eficiencia de remoción	Mediante la utilización de la planta *Typha latifolia* se obtuvo una eficiencia del 95% en cuanto a la depuración de los contaminantes	(Covarrubias & Cabriales, 2017)

A través de la recopilación de información y revisión bibliográfica en estudios de fitorremediación, pudimos constatar que cada una de las técnicas analizadas tiene cierto porcentaje de efectividad tomando en cuenta el lugar en donde vaya hacer aplicada. Una vez analizada cada una de sus características y factores de adecuación, se llegó a determinar que la rizofiltración es una de las técnicas que obtuvieron mejores resultados a la hora de tratar aguas residuales industriales con concentraciones de metales pesados.

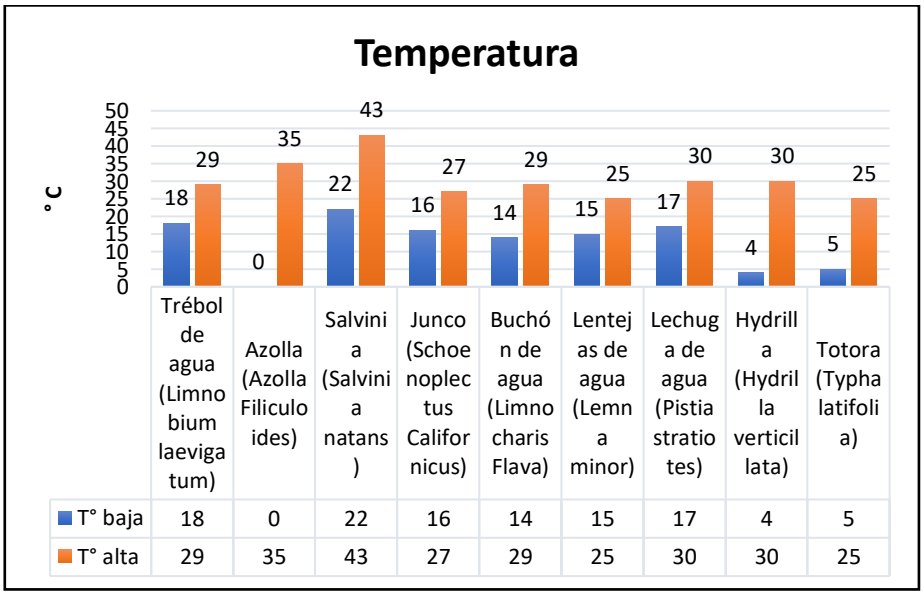


Figura 11. Temperatura de las plantas para su adaptabilidad

Las plantas depuradoras de metales pesados tienen una temperatura promedio de 25º C por lo cual pueden adaptase y desarrollarse en el ecosistema amazónico, la planta *Azolla filiculoides* puede adaptarse a temperaturas que van desde 0º C a 35 º C por lo que es considerada como una de las plantas que mejor adaptación tiene a un ecosistema.

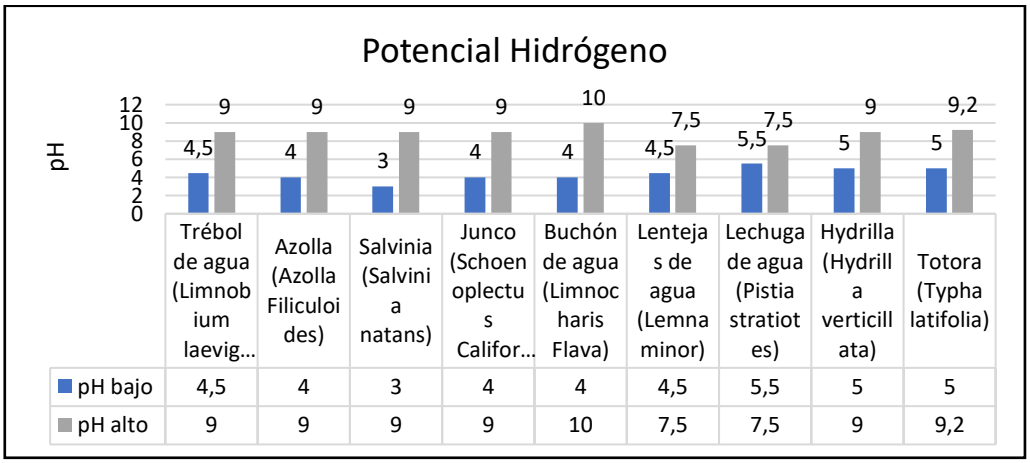


Figura 12. Adaptabilidad mediante el pH del agua

La planta *Salvinia natans* tiene una capacidad de pH acido 3 hasta un pH de 9 por lo que se considera un rango alto en la adaptabilidad, *Limnocharis flava* tienen un rango de pH 4 a 10 por lo que es una de las plantas que soporta el pH más alcalino, todas las plantas pueden desarrollarse en un pH neutro logrando alcanzar un desarrollo óptimo.

Tabla 12

Depuración de los contaminantes basados a la investigación

DMU	Contaminante inicial				Contaminante final			
	Cu mg/l	**Cr** mg/l	**Ni** mg/l	**Pb** mg/l	**Cu** mg/l	**Cr** mg/l	**Ni** mg/l	**Pb** mg/l
Trébol de agua (*Limnobium laevigatum)*	450	0	308	589	418.5	0	286.3	547.7
Lechuga de agua (*Pistia stratiotes*)	450	264	308	589	360.0	211.2	246.2	471.2
Hydrilla (*Hydrilla verticillata*)	0	0	308	589	0	0	230.9	441.8
Totora (*Typha latifolia*)	450	264	0	589	427.5	250.8	0	559.6
Junco (*Schoenoplectus californicus*)	450	264	308	589	382.5	224.4	261.0	500.7
Buchón de agua (*Limnocharis flava*)	450	264	308	589	405.0	237.6	277.1	530.1
Azolla *(Azolla filiculoides)*	450	264	308	589	418.5	245.5	286.3	547.7
Salvinia *(Salvinia natans)*	450	264	308	589	427.5	250.8	292.4	559.6
Lentejas de agua (*Lemna minor*)	450	264	308	589	441.0	258.7	301.6	577.2

Según los resultados obtenidos se pudo llegar a concluir que el Pb fue el contaminante que se encontró presento en cada una de las especies analizadas, en comparación del Cr, Cu y Ni las mismas que no se encontraron presentes en las especies: *Limnobium laevigatum, Hydrilla verticillata y Typha latifolia.*

Tabla 13

Eficiencia obtenida por el programa matemático MAXDEA

DMU	Eficiencia (CRS)
Trébol de agua (*Limnobium laevigatum)*	1.0
Lechuga de agua (*Pistia stratiotes*)	0.82
Hydrilla (*Hydrilla verticillata*)	1.0
Totora (*Typha latifolia*)	1.0
Junco (*Schoenoplectus californicus*)	0.86
Buchón de agua (*Limnocharis flava*)	0.91
Azolla *(Azolla filiculoides)*	0.94
Salvinia *(Salvinia natans)*	0.96
Lentejas de agua (*Lemna minor*)	1.0

A través de la aplicación del modelo matemático MAXDEA se obtuvieron los resultados en referencia al rango de eficiencia que posee cada una de las especies analizadas, las mismas que se detallan en la tabla 13.

Análisis de especies Vegetales y técnicas óptimas.

Después de un análisis bibliográfico minucioso, se determinaron las características de las especies vegetales de estudio, las mismas que son: *Limnobium laevigatum, Pistia stratiotes, Hydrilla verticillata, Typha latifolia, Schoenoplectus californicus, Limnocharis flava, Azolla filiculoides, Salvinia natans, Lemna minor,* dando como resultado su nivel de eficiencia en cuanto a remoción de metales pesados en aguas residuales industriales. Llegando a determinar que la aplicación de estas especies debe ser acompañada por una técnica óptima que se adapte a las características y condiciones de la planta, sin lugar a duda, se comprobó que la rizofiltracion, es una de las técnicas que más se adecúa debido a las condiciones y características de la planta para adaptarse y absorber sus contaminantes mediante las raíces.

CONCLUSIONES

- A partir del modelo DEA de comparación planteado en el proyecto de investigación, se realizó la ejecución mediante el programa matemático MAXDEA, que muestran que la especie *Lemna minor* alcanzó la eficiencia total con un valor de 1 lo cual nos indica que ésta es la especie que presenta un mayor rango de captación seguida por la *Salvinia natans* en segundo lugar con un valor de eficiencia de 0.96%.
- A través de los datos analizados se definió que la especie *Pistia stratiotes* y *Schoenoplectus californicus* fueron las plantas que obtuvieron un menor porcentaje de eficiencia con un valor de 0.86% para *Schoenoplectus californicus* y 0.82% para *Pistia stratiotes* siendo esta la de menor eficiencia.
- Mediante la aplicación del programa MAXDEA, se pudo identificar que las especies *Limnobium laevigatum, Hydrilla verticillata y Typha latifolia* obtuvieron una eficiencia de 1 dentro del rango de frontera de eficiencia aunque estas no presentaron un nivel completo de depuración para los metales pesados como: Cr, Cu y Ni por lo cual se las ha considerado dentro de un grupo único de análisis, convirtiéndolas en especies de menor grado de eficiencia en referencia a los contaminantes iniciales de estudio.
- Según los resultados obtenidos se pudo llegar a concluir que el Pb fue el contaminante que se encontró presento en cada una de las especies analizadas, en comparación del Cr, Cu y Ni las mismas que no se encontraron presentes en las especies: *Limnobium laevigatum, Hydrilla verticillata y Typha latifolia.*

RECOMENDACIONES

- Escoger de manera minuciosa las especies a utilizar en la remoción de metales pesados para garantizar óptimos resultados al finalizar la aplicación.
- Brindar un ambiente adecuado para que las plantas se desarrollen en su máximo potencial y lograr mejores resultados en la aplicación de fitorremediación
- Se recomienda utilizar la especie *Lemna minor* para estudios futuros en captación de metales pesados como: Cr, Cu, Ni y Pb ya que ha demostrado poseer características únicas que la convierten en una planta muy eficaz para procesos de fitorremediación.

- Se sugiere continuar con las investigaciones en procesos de fitorremediación debido a que esta es una metodología nueva de bajo costes y de muy fácil aplicabilidad.
- Para la aplicación de la metodología DEA, se recomienda tener bien claras las entradas y salidas para ejecutarlas en el programa matemático MAXDEA.

BIBLIOGRAFÍA

Agamez, B., & Victoria, S. (2018). *Fitorremediación como alternativa a la descontaminación de aguas residuales industriales con cargas de metales pesados*. Recuperado de http://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/17709

Agencia para sustancias toxicas y registro de enfermedades. (2019, enero 17). Resumen de salud pública: Níquel [Informativa]. Recuperado 13 de agosto de 2020, de ATSDR Agency for Toxic Substances and Disease Registry website: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs15.html

Alarcón, S., & Sánchez, M. (2013). *Business strategies, profitability and efficiency of production*. https://doi.org/10.5424/sjar/2013111-3093

Allioni, C. (1785). Salvinia natans. Recuperado 19 de septiembre de 2020, de Tropicos tropicos connecting the world to botanica data science website: https://www.tropicos.org/name/26612122

Arán, D., Harguinteguy, C. A., Cirelli, A. F., & Pignata, M. L. (2016). *Fitoextracción de Pb, Cr, Ni, y Zn por la planta acuática Limnobium laevigatum y su potencial uso en el tratamiento de aguas residuales*. 15.

Arias, J. (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*(1), 151-167. https://doi.org/10.22490/21456453.1846

Arias, S., Betancur, F., Gómez, G., Salazar, J., & Hernández, M. (2010). *Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas*. Recuperado de https://www.academia.edu/38765575/Fitorremediaci%C3%B3n_con_humedales_artificiales_para_el_tratamiento_de_aguas_residuales_porcinas

Arroyave, M. del P. (2004). La lenteja de agua (*Lemna minor l.*): Una planta acuática promisoria*. *Revista EIA*, (1), 33-38.

ATSDR. (2004). Resumen de salud pública: Cobre. Recuperado 14 de agosto de 2020, de https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs132.pdf

Ayala, S. M. R. (2018). *Bioacumulación de metales pesados en schoenoplectus californicus (cyperaceae) de las áreas bentónicas en dos estaciones climáticas: El caso de estudio del lago San Pablo. Imbabura-Ecuador.* (Universidad de Sevilla). Universidad de Sevilla, Sevilla. Recuperado de https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/83205/Tesis_suly%20rodr%C3%ADguez_FINAL_2.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Barceló, J. (1992). *Respuestas De Las Plantas A La Contaminacion Por Metales Pesados* (Universidad Autónoma de Barcelona). Universidad Autónoma de Barcelona, España. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Juan_Barcelo/publication/285841974_Respuestas_de_las_plantas_a_la_contaminacion_por_metales_pesados/links/5668061708aea62726ef99f8.pdf

Bedoya, B. (2013). *Evaluación de la actividad fitorremediadora del schoenoplectus californicus "junco" en agua contaminada con arsénico.* (Tesis, Universidad nacional Jorge Basadre Grohmann-Tacna). Universidad nacional Jorge Basadre Grohmann-Tacna, Tacna. Recuperado de http://repositorio.unjbg.edu.pe/bitstream/handle/UNJBG/2029/372_2014_bedoya_escobar_bm_facs_farmacia.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Beltrán, M., & Gómez, A. (2016). Biorremediación de metales pesados cadmio (Cd), cromo (Cr) y mercurio (Hg), mecanismos bioquímicos e ingeniería genética:

Una revisión. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, *12*(2), 172-197. https://doi.org/10.18359/rfcb.2027

Benavides, F., & Méndez, J. (2020). *Determinación de las concentraciones de plomo y cromo asociados a poblaciones de Typha latifolia en la laguna de Yahuarcocha, provincia de Imbabura*. Recuperado de http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/10337

Benitez, M., Torres, A., & Ochoa, V. (2018). Tratamiento de aguas residuales para remoción de nutrientes con microalgas nativas ecuatorianas. *Environmental Technology*, *40*, 1-27. https://doi.org/10.1080/09593330.2018.1459874

Biología, I. de. (2008). Limnocharis flava (L.) Buchena. *UNIBIO: Colecciones Biológicas*. Recuperado de http://unibio.unam.mx/collections/specimens/urn/IBUNAM:MEXU:PA706840

Buchenau, F. (1868). Limnocharis flava. Recuperado 19 de septiembre de 2020, de Tropicos tropicos connecting the world to botanica data science website: https://www.tropicos.org/name/4800004

Burgos, A. C. C. (2018). *Estudio comparativo de los efectos físicos causados por agua contaminada con sales de cromo en Lemna minor y Limnobium laevigatum.* Recuperado de http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/9028/1/236T0347.pdf

Camacho, A., & Ariosa, L. (2000). *Diccionario de términos ambientales*. La Habana: Centro Félix Varela.

Carpio, D. (2013). *Análisis de eficiencia de fitorremediación de dos plantas nativas del Oriente Ecuatoriano para tratamiento de aguas grises y negras en humedales artificiales en el campamento amo 1, bloque 16*. Recuperado de http://dspace.udla.edu.ec/handle/33000/2264

Carranza, C., Alonso, A., Alfaro, M., & García, R. (2008). Accumulation and Distribution of Heavy Metals in Scirpus americanus and Typha latifolia from an Artificial Lagoon in San Luis Potosí, México. *Water, Air, and Soil Pollution*, *188*(1), 297-309. https://doi.org/10.1007/s11270-007-9545-3

Carrillo, G. (2017). *Evaluación de Salvinia como potencial acumuladora de Cu y Zn de agua residual porcina: Efectos fisiológicos, morfológicos y de crecimiento.* (Centro de investigación científica de Yukatán.). Centro de investigación científica de Yukatán., Yukatán. Recuperado de https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/433/1/PCB_RN_M_Tesis_2017_Carrillo_%20Gerardo.pdf

Caviedes, D., Delgado, D., & Olaya, A. (2016). *Remoción de metales pesados comúnmente generados por la actividad industrial, empleando macrófitas neotropicales*. https://doi.org/10.22507/pml.v11n2a11

Clemens, S. (2002). *Fitorremediacion: Una alternativa para la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos* (Monografía, Universidad Industrial De Santander Escuela De Quimica). Universidad Industrial De Santander Escuela De Quimica, Bucaramanga. Recuperado de http://noesis.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/39272/1/119600.pdf

Cordero, J. (2006). *Evaluación de la eficiencia con factores exógenos mediante el Análisis Envolvente de Datos: Una aplicación a la Educación Secundaria en España* (Http://purl.org/dc/dcmitype/Text, Universidad de Extremadura). Universidad de Extremadura. Recuperado de https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=1488

Covarrubias, S. A., & Cabriales, J. J. P. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista*

Internacional de Contaminación Ambiental, *33*(0), 7-21. https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.esp01.01

Cruz, J., Morín, J., Cruz, A., Tamayo, R., Taylor, T., & Samiñón, M. (2012). Fosfato de cromo (III) marcado con diferentes radionúclidos para uso en radiosinoviortesis. *Revista Cubana de Farmacia*, *46*(2), 162-172.

Cruz, M., Carbo, N., Gonzales, J., Tito, G. M., Depaz, K., Torres, S., … Quispe, W. (2016). Tratamiento de las aguas de la laguna "mansión" mediante la especie eichhorniacrassipes, para el riego de áreas verdes en la universidad peruana Unión. *IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science*, *09*(08), 53-65. https://doi.org/10.9790/2380-0908025365

Cuberos, E., Rodríguez, A., & Prieto, E. (2009). Niveles de Cromo y Alteraciones de Salud en una Población Expuesta a las Actividades de Curtiembres en Bogotá, Colombia. *Revista de Salud Pública*, *11*(2). Recuperado de https://revistas.unal.edu.co/index.php/revsaludpublica/article/view/10299

DAFF. (2015, octubre 30). Salvinia Natans [Collection; Text]. Recuperado 22 de agosto de 2020, de Departament of Agriculture, Fisheries and Foresty website: https://www.business.qld.gov.au/industries/farms-fishing-forestry/agriculture/land-management/health-pests-weeds-diseases/weeds-diseases/invasive-plants/restricted/salvinia

Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Cochabamba-Bolivia: Nelson Antequera. Recuperado de https://books.google.com.pe/books?id=1kO2J5aDljQC&pg=PA25&lpg=PA25&dq=ADAPTACION+DE+LA+TOTORA&source=bl&ots=Kgm5u1yYYh&sig=5RKRE1kjuv3m5i7FByr4G62I&hl=es419&sa=X&ei=6_qSUvKiLozfkQfPjYCYDw&ved=0CC4Q6AEwAQ#v=onepage&q=ADAPTACION%20DE%20LA%20TOTORA&f=false

EcuRed. (2011). Salvinia natans—EcuRed. Recuperado 22 de agosto de 2020, de ECURED website: https://www.ecured.cu/Salvinia_natans

EcuRed. (2014). Totora—EcuRed. Recuperado 24 de agosto de 2020, de ECURED website: https://www.ecured.cu/Totora

EcuRed. (2015a). Níquel—EcuRed [Enciclopedia Colaborativa]. Recuperado 13 de agosto de 2020, de ECURED website: https://www.ecured.cu/N%C3%ADquel

EcuRed. (2015b). Plomo—EcuRed [Enciclopedia Colaborativa]. Recuperado 13 de agosto de 2020, de ECURED website: https://www.ecured.cu/Plomo

Enciclopedia. (2016). Plomo: Qué es, propiedades, usos, riesgos y características [Enciclopedia Colaborativa]. Recuperado 13 de agosto de 2020, de Enciclopedia de caracteristicas website: https://www.caracteristicas.co/plomo/

Erazo, C., & Andres, J. (2018). *Evaluación técnico-financiera del proceso de fitorremediación con plantas gramíneas para mitigar derrames de crudo en el departamento del Meta, Colombia*. Recuperado de https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/6742

FAO. (1992). Food for the Cities: Aguas residuales y saneamiento. Recuperado 2 de septiembre de 2020, de http://www.fao.org/fcit/environment-health/water-sanitation/es/

FAO. (2015). *Towards a water and food secure future: Critical perspectives for policy-makers*. 76.

Fernández, N., Ramírez, A., & Solano, F. (2003). *Índices fisicoquímicos de calidad del agua. Un estudio comparativo*. 211-219.

Figueroa, S., & Scarlett, L. (2018). *Evaluación del efecto de las plantas acuáticas en tratamiento de aguas servidas.* Recuperado de http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/10146

Flores, Y., & Cortez, Á. (2006). *Bioabsorcion de metales pesados por salvinia natans.* (p. 12) [Documental- Experimental]. Tolima: Universidad de Tolima.

Floresyplantas.net. (2017). Pistia stratiotes. Recuperado 21 de agosto de 2020, de Revista de Flores, Plantas, Jardinería, Paisajismo y Medio ambiente website: https://www.floresyplantas.net/pistia-stratiotes/

Gil, M. J., Soto, A. M., Usma, J. I., & Gutiérrez, O. D. (2012). *Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos*. 22.

Heine, H. (1968). Limnobium laevigatum. Recuperado 19 de septiembre de 2020, de Tropicos tropicos connecting the world to botanica data science website: https://www.tropicos.org/person/5407

Jaime, A., & Luque, P. (2016). *Envolvente de Datos (DEA). Resolución de casos prácticos.* 93.

Jaramillo Jumbo, M. D. C., & Flores Campoverde, E. D. (2012). *Fitorremediación mediante el uso de dos especies vegetales Lemna minor (Lenteja de agua), y Eichornia crassipes (Jacinto de agua) en aguas residuales producto de la actividad minera*. Recuperado de http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/2939

Lamark, J. (1783). Azolla filiculoides. Recuperado 19 de septiembre de 2020, de Tropicos tropicos connecting the world to botanica data science website: https://www.tropicos.org/name/26602847

Laubstein, U. (2010). La Intoxicación por metales pesados. Recuperado 2 de julio de 2020, de https://www.absolum.org/salud_metales.htm

Lenntech. (2008). Cromo (Cr) Propiedades químicas y efectos sobre la salud y el medio ambiente. Recuperado 13 de agosto de 2020, de https://www.lenntech.es/periodica/elementos/cr.htm

Lenntech. (2011). Cobre (Cu) Propiedades químicas y efectos sobre la salud y el medio ambiente. Recuperado 14 de agosto de 2020, de https://www.lenntech.es/periodica/elementos/cu.htm

Lenntech. (2014). Plomo (Pb) propiedades químicas y efectos sobre la salud y el medio ambiente [Conocimiento de tratamiento de aguas]. Recuperado 13 de agosto de 2020, de LENNTECH website: https://www.lenntech.es/periodica/elementos/pb.htm

Lenntech. (2015). Niquel (Ni) propiedades químicas y efectos sobre la salud y el medio ambiente. Recuperado 13 de agosto de 2020, de LENNTECH website: https://www.lenntech.es/periodica/elementos/ni.htm

Lindig, R. (2017). *Ecología de la restauración y restauración ambiental*. Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado de http://www.librosoa.unam.mx/xmlui/handle/123456789/256

Linneo, C. (1753a). Lemna minor. Recuperado 19 de septiembre de 2020, de Tropicos tropicos connecting the world to botanica data science website: https://www.tropicos.org/name/18100039

Linneo, C. (1753b). Pistia stratiotes. Recuperado 19 de septiembre de 2020, de Tropicos tropicos connecting the world to botanica data science website: https://www.tropicos.org/name/2103622

Linneo, C. (1753). Typha latifolia. Recuperado 19 de septiembre de 2020, de Tropicos tropicos connecting the world to botanica data science website: https://www.tropicos.org/name/33200002

Londoño, L., Londoño, P., & Muñoz, F. (2016). *Risk of heavy metals in human and animal health. 14*(2), 9.

Madueño, J., Jorge, M., & Gardey, G. (2012). Una propuesta metodológica para el análisis de la eficiencia de las pequeñas y medianas empresas familiares. *Revista española de financiación y contabilidad*, (154), 291-308.

Mayland, H. (1990). *Plantas vasculares de aguas continentales.* DAIMON. Recuperado de https://core.ac.uk/download/pdf/39858419.pdf

Mendoza, Y. I., I. Pérez, J., Galindo, A. A., Mendoza, Y. I., I. Pérez, J., & Galindo, A. A. (2018). Evaluación del Aporte de las Plantas Acuáticas Pistia stratiotes y Eichhornia crassipes en el Tratamiento de Aguas Residuales Municipales. *Información tecnológica*, *29*(2), 205-214. https://doi.org/10.4067/S0718-07642018000200205

Monroy, M., & Muñoz, Y. (2019). Aplicación del modelo Enseñanza para la comprensión: Fitorremediación para la remoción de Plomo II con Aloe vera (Aloe barbadensis miller). *Reponame:Repositorio Institucional de La Universidad Pedagógica Nacional*. Recuperado de http://repository.pedagogica.edu.co/handle/20.500.12209/9774

Monroy Tovar, M. A., & Muñoz Arias, Y. A. (2019). Aplicación del modelo Enseñanza para la comprensión: Fitorremediación para la remoción de Plomo II con Aloe vera (Aloe barbadensis miller). *Reponame:Repositorio Institucional de La Universidad Pedagógica Nacional*. Recuperado de http://repository.pedagogica.edu.co/handle/20.500.12209/9774

Montoya, N. P. M., Casas, P. A., & Wandurraga, C. C. (2010). Plomo, cromo III y cromo VI y sus efectos sobre la salud humana. *Ciencia y Tecnología para la Salud Visual y Ocular*, *8*(1), 77-88.

Muños, V. (2010). *Tratamiento biológico combinado con filtración en tamices moleculares, de aguas contaminadas con hidrocarburos, afectadas por el derrame de la línea de flujo del pozo Shushuqui 13, Cantón Lago Agrio, Provincia de Sucumbios, Ecuador* (Tesis, Universidad de las Américas). Universidad de las Américas, Lago Agrio. Recuperado de http://dspace.udla.edu.ec/bitstream/33000/2282/1/UDLA-EC-TIAM-2010-10.pdf

Núñez, R., Vong, Y., Ortega, R., & Olguín, E. (2004). *Fitorremediacion: Fundamentos y aplicaciones*. 69-82.

OMS. (1975). Empleo inocuo de plaguicidas: Clasificacion de los plaguicidas por el peligro que presentan. *Community Dentistry and Oral Epidemiology*. https://doi.org/10.1046/j.1600-0528.2003.00124.x

OPS. (2017). Agua y Saneamiento—OPS/OMS | Organización Panamericana de la Salud. Recuperado 2 de septiembre de 2020, de http://www.paho.org/es/temas/agua-saneamiento

Paiz, M. (2007). *Caracterización, diagnóstico y formulación de lineamientos para el control de Hydrilla verticillata*. 70.

Paredes, K. P. (2017). *Fitoestabilización de metales pesados en sedimentos costeros asistida por bacterias rizosféricas*. 155.

Pisfil, K., & Barbosa, R. (2015). *Evaluación de la planta helecho de agua Azolla filiculoides.* Tecnología presentado en Lambayeque. Lambayeque. Recuperado de https://es.slideshare.net/KatherynPisfilColcha/evaluacion-de-la-planta-helechito-de-agua-azolla-filiculoides-comofitorremediador-sobre-aguas-contaminada-con-cobre

Pizarro, J. (2015, agosto 5). La fitorremediación: Plantas para tratar la contaminación ambiental. Recuperado 25 de junio de 2020, de Agriculturers.com | Red de Especialistas en Agricultura website: https://agriculturers.com/la-fitorremediacion-plantas-para-tratar-la-contaminacion-ambiental/

Ponce, M., & Rodrigo, S. (2016). *Evaluación de la bioconcentración de dos especies de macrofitas acuáticas (Eichhornia crassipes y Lemna spp) en la fitorremediación de un medio contaminado con plomo.* Recuperado de http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/6174

Poveda, A. (2014). *"Evaluación de especies acuáticas flotantes para la fitorremediación de aguas residuales industrial y de uso agrícola previamente caracterizadas en el cantón Ambato, provincia de Tungurahua"* (Universidad Técnica de Ambato). Universidad Técnica de Ambato, Ambato. Recuperado de https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/8455

PyJ. (2011). Plantas acuáticas, introducción, descripción, Plantas y Jardín [Informativa]. Recuperado 18 de agosto de 2020, de Plantas y Jardin website: http://plantasyjardin.com/2011/01/plantas-acuaticas-introduccion-descripcion/

Quiroz, L., Izquierdo, E., & Menéndez, C. (2017). Aplicación del índice de calidad de agua en el río Portoviejo, Ecuador. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, *38*(3), 41-51.

Rios, A. R., & Shively, G. E. (2005). Farm size and nonparametric efficiency measurements for coffee farms in Vietnam. En *2005 Annual meeting, July 24-27, Providence, RI* (N.º 19159). American Agricultural Economics Association (New Name 2008: Agricultural and Applied Economics Association). Recuperado de American Agricultural Economics Association (New Name 2008: Agricultural and Applied Economics Association) website: https://ideas.repec.org/p/ags/aaea05/19159.html

Robles, M. (2013). *Evaluacion de sistemas de fitorremediacion de aguas residuales dentro de una biorrefineria*. Recuperado de https://inecol.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1005/61/1/6576_2013-10400.pdf

Robles, W., & Madsen, J. D. (2015). *Hydrilla [Hydrilla verticillata (L.F.) Royle]*. 2.

Rodriguez, V., & Ivaldi, E. (2016). Eficacia De La Fitorremediacion De Las Aguas Residuales Del Dren 2210 Utilizando Lenteja De Agua (Lemna Minor). *Repositorio Institucional-UCV*. Recuperado de http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/34568

Royle, J. (1839). Hydrilla verticillata. Recuperado 19 de septiembre de 2020, de Tropicos tropicos connecting the world to botanica data science website: https://www.tropicos.org/name/16100005

Ruiz, A. (2010). *Revista de Química de la Universidad Pablo de Olavide*. 68.

Sobrero, M. C. (2010). *Estudio de la fitotoxicidad de metales pesados y del herbicida glifosato en ambientes acuáticos* (Tesis, Universidad Nacional de La Plata). Universidad Nacional de La Plata. https://doi.org/10.35537/10915/5246

Soják, J. (1972). Schoenoplectus californicus. Recuperado 19 de septiembre de 2020, de Tropicos tropicos connecting the world to botanica data science website: https://www.tropicos.org/name/9904887

Syukor, A. R. A., Sulaiman, S., Siddique, Md. N. I., Zularisam, A. W., & Said, M. I. M. (2016). Integration of phytogreen for heavy metal removal from wastewater. *Journal of Cleaner Production*, *112*, 3124-3131. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.103

Tamayo, S. S., & Esquivel, E. M. (2014). El desarrollo industrial y su impacto en el medio ambiente. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología.*, 7.

Valderrama, L. T. (1996). *Limnobium laevigatum Y Eichhornia crassipes*. *3*, 16.

Valdez, E., & Uribe, E. (2016). El derecho humano al agua. Una cuestión de interpretación o de reconocimiento. *Cuestiones Constitucionales*, *34*, 3-25. https://doi.org/10.1016/j.rmdc.2016.07.001

Vélez, P., & Anderson, N. (2017). Análisis del Nivel de Fitorremediación de mercurio utilizando eichhornia crossipes y lemna minor en una muestra de agua contaminada artificialmente, Trujillo—2017. *Repositorio Institucional - UCV*. Recuperado de http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/35931

Violeta. (2012, julio 28). Limnocharis flava. Recuperado 24 de agosto de 2020, de Flores website: http://www.florflores.com/limnocharis-flava-2/

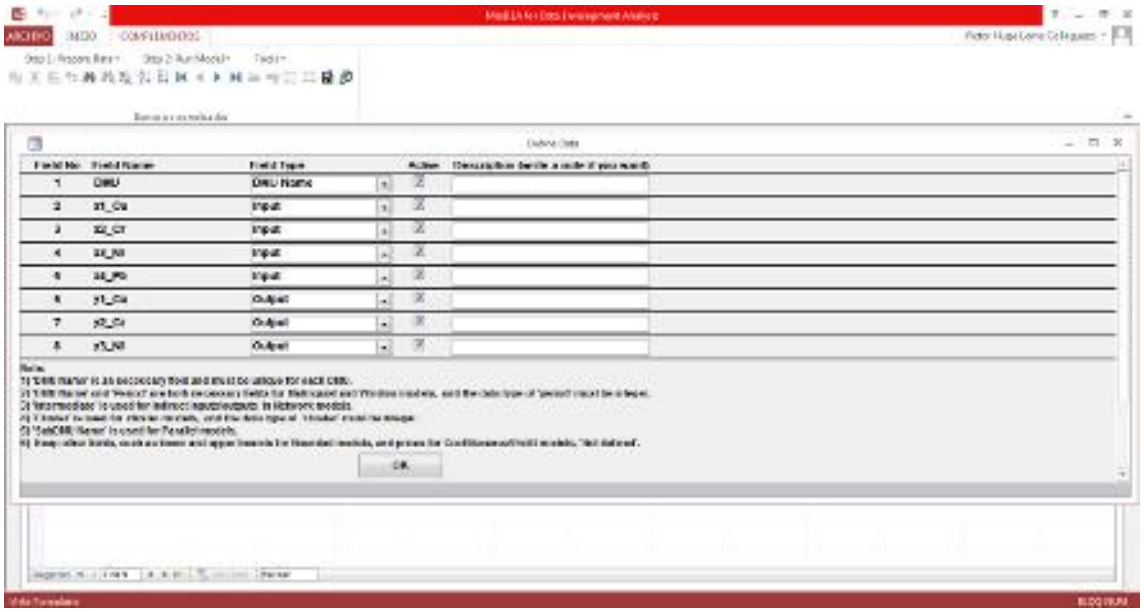
Wang, J. (1996). *Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua.* (p. 17) [Red de revistas científicas]. Merida. Recuperado de https://www.redalyc.org/revista.oa?id=939

Wetsel, R. (1981). *Limnologia* (p. 9). Costa Rica: Uniciencia. Recuperado de Uniciencia website: file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Dialnet-VariacionEstacionalEnElLagoDeRioCuartoProvinciaDeA-5381286.pdf

Zhang, H., Zhang, L.-L., Li, J., Chen, M., & An, R.-D. (2020). Comparative study on the bioaccumulation of lead, cadmium and nickel and their toxic effects on the growth and enzyme defence strategies of a heavy metal accumulator, Hydrilla verticillata (L.f.) Royle. *Environmental Science and Pollution Research*, *27*(9), 9853-9865. https://doi.org/10.1007/s11356-019-06968-0

ANEXOS

Anexo A1. Definición de variables en software MAXDEA



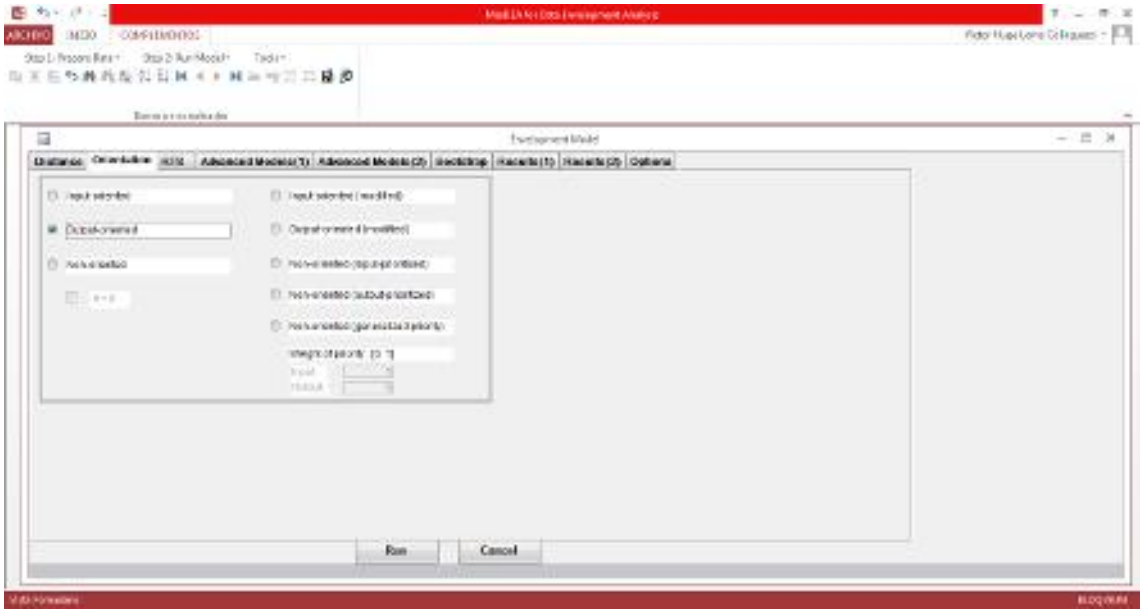
Fuente: Autores

Anexo A2. Ingreso de datos al programa MAXDEA



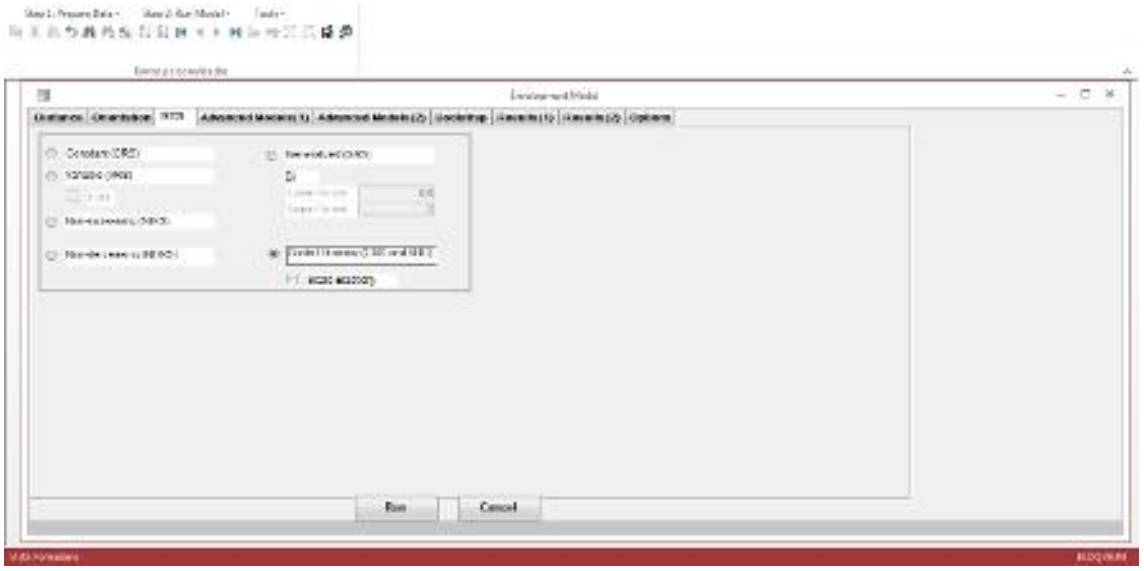
Fuente: Autores

Anexo A3. Definición de variables en el modelo



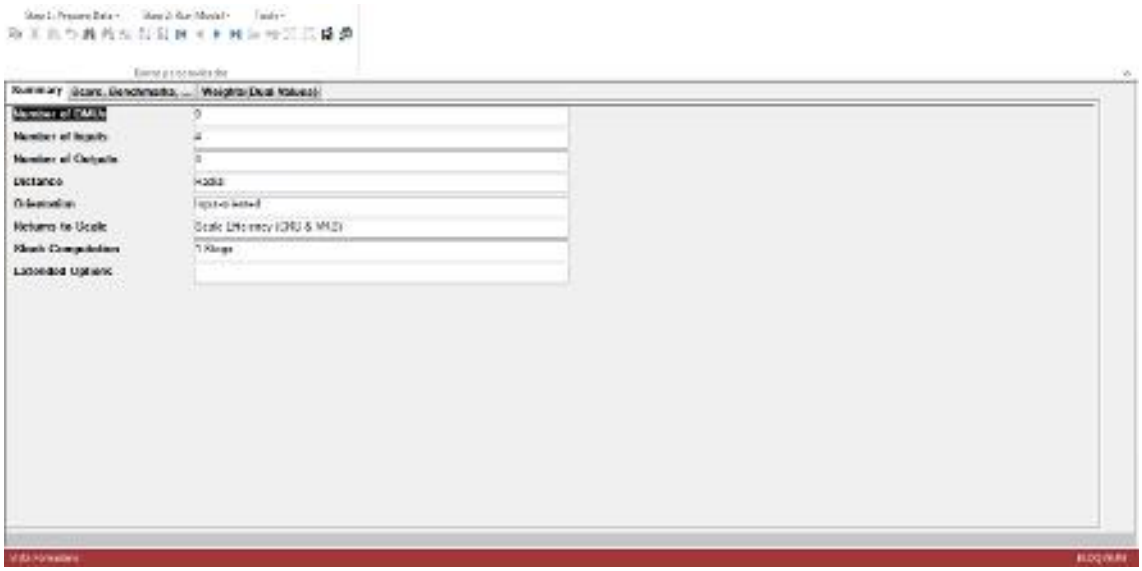
Fuente: Autores

Anexo A4. Definición de variables en el modelo



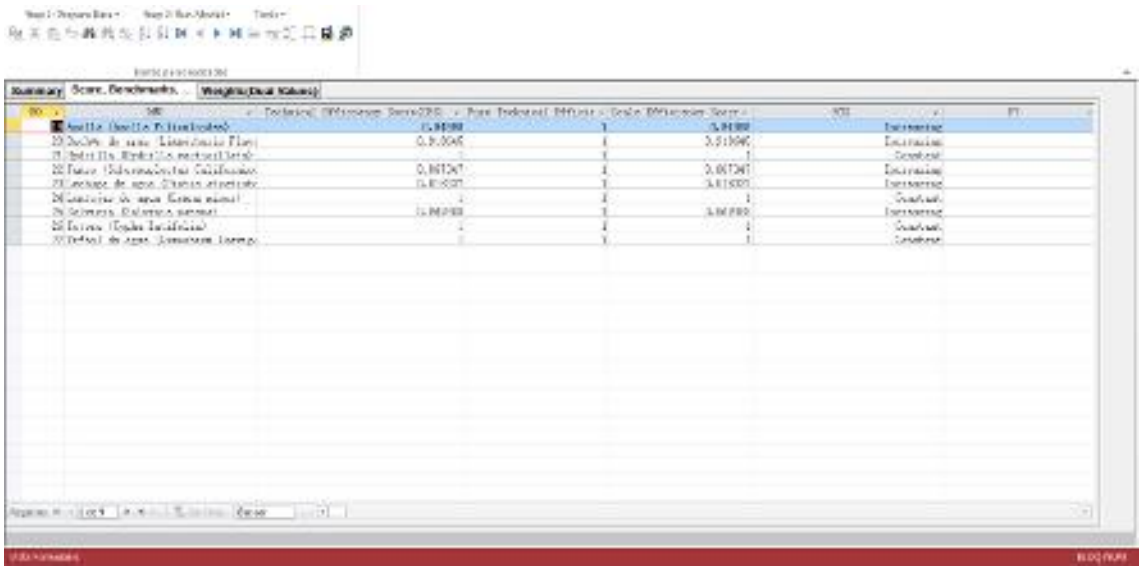
Fuente: Autores

Anexo A5. Sumary de aplicación de DEA



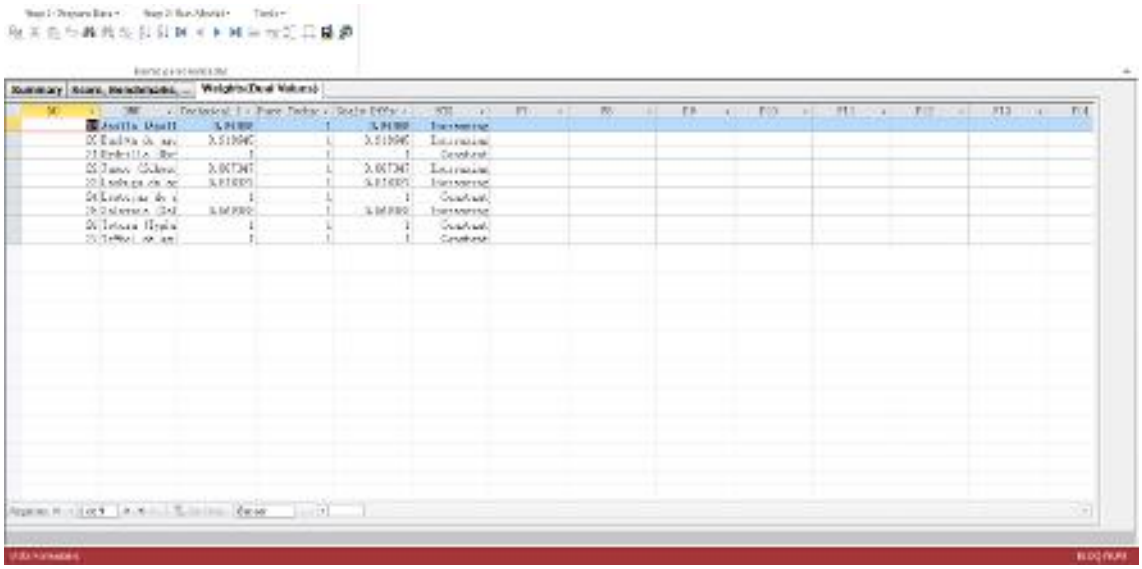
Fuente: Autores

Anexo A6. Resultados de la eficiencia (ScoreBenchmarks) por medio del programa MAXDEA



Fuente: Autores

Anexo A7. Resultados de (Dual values) mediante MAXDEA



Fuente: Autores