



**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**TESIS**

**EVALUACIÓN DE DOS ESPECIES VEGETALES  
EN LA FITORREMEDIACIÓN DE METALES  
PESADOS EN EL RÍO MOQUEGUA, 2018**

**PRESENTADO POR EL BACHILLER:**

**BEDOYA JUSTO EDGAR VIRGILIO**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO AMBIENTAL**

**LIMA – PERÚ**

**2019**

## **DEDICATORIAS**

A la memoria de mi madre Doraliza Inés y a mi padre Juan, con cariño y gratitud, por todo su amor y confianza permanente, por inculcarme sus valores y sabios consejos en todo momento.

A mi esposa Haydé Ofelia, por su capacidad de tolerancia, comprensión, aliento constante, apoyo incondicional y fuente inagotable de cariño.

A mi única hija Daniela Victoria, por constituir una fuente inagotable de mi perseverancia y de inspiración.

## **AGRADECIMIENTOS**

A las autoridades, docentes y personal administrativo de la Universidad Alas Peruanas, por permitirme lograr mi anhelo de perfeccionamiento profesional.

A todos los que apoyaron y cooperaron directa e indirectamente para la ejecución del trabajo de investigación.

**Muchas gracias.**

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Contenido	iv
Índice de tablas	ix
Índice de figuras	x
Índice de anexos	xi
Resumen	xii
Abstract	xiii
Introducción	xiv
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	
1.1. Caracterización de la realidad problemática	2
1.2. Formulación del problema	3
1.2.1. Problema general	3
1.2.2. Problemas específicos	4
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivo general	4
1.3.2. Objetivos específicos	4
1.4. Justificación	4
1.4.1. Práctica	4
1.4.2. Teórica	5
1.4.3. Metodológica	5
1.5. Importancia	5
1.6. Limitaciones	6
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b>	
2.1. Marco referencial	8
2.1.1. Antecedentes de la investigación	8

2.1.1.1. Internacionales	8
2.1.1.2. Nacionales	10
2.1.1.3. Locales	10
2.2. Marco conceptual	11
2.2.1. Remediación	11
2.2.2. Biorremediación	11
2.2.3. Fitorremediación	11
2.2.4. Remoción	11
2.2.5. Contaminación	12
2.2.6. Planta acumuladora	12
2.2.7. Metales pesados	12
2.2.8. Fitodepuración	12
2.3. Marco teórico	13
2.3.1. Biorremediación	13
2.3.2. Tipos de biorremediación	13
2.3.3. Biorremediación y contaminación ambiental	14
2.3.4. Fitorremediación	15
2.3.5. Fitoextracción	17
2.3.6. Plantas hiperacumuladoras de metales pesados	19
2.3.7. Metales pesados en el ambiente	20
2.3.8. Aguas del río Moquegua	21
2.3.9. Situación de las aguas del embalse Pasto Grande	24

### CAPÍTULO III

#### PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

3.1. Metodología	27
3.1.1. Método	27
3.1.1.1. Ubicación geográfica	27
3.1.1.2. Procedimiento para la toma de muestras	27
3.1.2. Tipo de la investigación	29
3.1.3. Nivel de la investigación	29
3.2. Diseño de la investigación	29
3.3. Hipótesis de la investigación	31

3.3.1. Hipótesis general	31
3.3.2. Hipótesis específicas	31
3.4. Variables	31
3.4.1. Variable independiente: especies vegetales	31
3.4.2. Variable dependiente: calidad de agua	31
3.4.3. Variable interviniente: fitorremediación	31
3.4.4. Operacionalización de variables	31
3.5. Cobertura del estudio	32
3.5.1. Población	32
3.5.2. Muestra	33
3.5.3. Muestreo	33
3.6. Técnicas e instrumentos	33
3.6.1. Técnicas de la investigación	33
3.6.1.1. Procedimiento	33
3.6.1.2. Análisis químico	34
3.6.2. Instrumentos de la investigación	34
3.6.2.1. Materiales	35
3.6.2.2. Equipos	35
3.6.2.3. Reactivos	35
3.6.3. Fuentes	35
3.7. Procesamiento estadístico de la información	36
3.7.1. Estadísticos	36
3.7.2. Representación	37
3.7.3. Técnica de comprobación de la hipótesis	37

## CAPÍTULO IV

### ORGANIZACIÓN, PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Resultados	39
4.1.1. Fitorremediación de aluminio en aguas del río Moquegua utilizando <i>Eichhornia crassipes</i> y <i>Lemna minor</i>	39
4.1.2. Fitorremediación de boro en aguas del río Moquegua utilizando <i>Eichhornia crassipes</i> y <i>Lemna minor</i>	41
4.1.3. Fitorremediación de hierro en aguas del río Moquegua	

utilizando <i>Eichhornia crassipes</i> y <i>Lemna minor</i>	43
4.1.4. Fitorremediación de manganeso en aguas del río Moquegua utilizando <i>Eichhornia crassipes</i> y <i>Lemna minor</i>	45
4.2. Discusión de resultados	47
4.3. Contrastación de hipótesis	53
CONCLUSIONES	55
RECOMENDACIONES	56
BIBLIOGRAFÍA	57
ANEXOS	62

**ABREVIATURAS**

<b>ANA</b>	Autoridad Nacional del Agua
<b>ALA</b>	Autoridad Local del Agua
<b>ANVA</b>	Análisis de variancia
<b>CM</b>	Cuadrados medios
<b>DBO</b>	Demanda biológica de oxígeno
<b>DCA</b>	Diseño Completamente Aleatorio
<b>DIGESA</b>	Dirección General de Salud
<b>DIREPRO</b>	Dirección Regional de Producción
<b>ECA</b>	Estándares Nacionales de Calidad Ambiental
<b>FC</b>	Prueba de F (Fisher) calculado
<b>FT</b>	Prueba de F (Fisher) tabular
<b>FV</b>	Fuentes de variación
<b>GERESA</b>	Gerencia Regional de Salud
<b>GL</b>	Grados de libertad
<b>MINAGRI</b>	Ministerio de Agricultura y Riego
<b>MINSA</b>	Ministerio de Salud
<b>NT</b>	Nitratos totales
<b>OMS</b>	Organización Mundial de la Salud
<b>PERPG</b>	Proyecto Especial Regional Pasto Grande
<b>PTAR</b>	Planta de Tratamiento de Agua Residual
<b>SC</b>	Suma de cuadrados
<b>Senamhi</b>	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
<b>STS</b>	Sólidos totales solubles



## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Mecanismos de fitorremediación	17
Tabla 2. Número de plantas hiperacumuladoras de metales en el mundo	20
Tabla 3. Operacionalización de variables	32
Tabla 4. Tratamientos del experimento	36
Tabla 5. Análisis de variancia (ANVA)	36
Tabla 6. Análisis de variancia de la fitorremediación de aluminio utilizando <i>Eichhornia crassipes</i> y <i>Lemna minor</i>	40
Tabla 7. Prueba de significación de Tukey de la fitorremediación de aluminio utilizando <i>Eichhornia crassipes</i> y <i>Lemna minor</i>	40
Tabla 8. Análisis de variancia de la fitorremediación de boro utilizando <i>Eichhornia crassipes</i> y <i>Lemna minor</i>	42
Tabla 9. Prueba de significación de Tukey de la fitorremediación de boro utilizando <i>Eichhornia crassipes</i> y <i>Lemna minor</i>	42
Tabla 10. Análisis de variancia de la fitorremediación de hierro utilizando <i>Eichhornia crassipes</i> y <i>Lemna minor</i>	44
Tabla 11. Prueba de significación de Tukey de la fitorremediación de hierro utilizando <i>Eichhornia crassipes</i> y <i>Lemna minor</i>	44
Tabla 12. Análisis de variancia de la fitorremediación de manganeso utilizando <i>Eichhornia crassipes</i> y <i>Lemna minor</i>	46
Tabla 13. Prueba de significación de Tukey de la fitorremediación de manganeso utilizando <i>Eichhornia crassipes</i> y <i>Lemna minor</i>	46
Tabla 14. Análisis de variancia de la fitorremediación de aluminio, boro, hierro y manganeso, en cuatro tratamientos, utilizando <i>Eichhornia crassipes</i> y <i>Lemna minor</i>	54

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Tipos de biorremediación	14
Figura 2. Esquema experimental	30
Figura 3. Fitorremediación de aluminio en aguas del río Moquegua utilizando <i>Eichhornia crassipes</i> y <i>Lemna minor</i>	41
Figura 4. Fitorremediación de boro en aguas del río Moquegua utilizando <i>Eichhornia crassipes</i> y <i>Lemna minor</i>	43
Figura 5. Fitorremediación de hierro en aguas del río Moquegua utilizando <i>Eichhornia crassipes</i> y <i>Lemna minor</i>	45
Figura 6. Fitorremediación de manganeso en aguas del río Moquegua utilizando <i>Eichhornia crassipes</i> y <i>Lemna minor</i>	47

**ÍNDICE DE ANEXOS**

	<b>Pág.</b>
Anexo 01. Matriz de consistencia	63
Anexo 02. Mapa de ubicación del experimento	64
Anexo 03. Fotos del trabajo de investigación	65
Anexo 04. Especies vegetales utilizadas en la investigación	71
Anexo 05. Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Aguas (ECA). Categoría 3.	74
Anexo 06. Constancias de análisis químico	76
Anexo 07. Propuesta de planta de tratamiento	81

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo evaluar dos especies vegetales en la fitorremediación de metales pesados en el río Moquegua. Las especies vegetales que se utilizaron fueron *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor* y los metales evaluados fueron aluminio, boro, hierro y manganeso. Se utilizó el diseño completamente al azar (DCA) con cuatro tratamientos y dos repeticiones. Para la toma de muestra del afluente (ingreso) y efluente (salida) de los tratamientos que se aplicaron, fue de acuerdo al Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales. El experimento se inició con la derivación de agua del río a una poza de fitorremediación, luego se propagaron las especies por un tiempo de 60 días, quedando cubierta toda la superficie; posteriormente se sometieron a las especies vegetales a cuatro tratamientos (tiempos): 0, 10, 20 y 30 días, con agua del río Moquegua, tomándose muestras en el afluente (tratamiento 0) y en los efluentes de los tratamientos (10, 20 y 30 días) para el análisis químico en laboratorio a través de la espectrofotometría de absorción atómica. Se encontró que a los 10 días se logra obtener una remoción de aluminio en el agua del 84,99 %, y a los 30 días (afluente final) se logró una remoción del 90,41 %; para el boro a los 10 días se logra obtener una remoción del 84,98 %, y a los 30 días se logró un 88,64 %; en cuanto al hierro a los 10 días se logra obtener una remoción del 86,24 %, y a los 30 días el 89,33 %; finalmente, para el manganeso a los 10 días se logra obtener una remoción del 85,79 %, y a los 30 días se logró un 94,71 %. En conclusión, se encontró que la capacidad de remoción de metales pesados como el aluminio, boro, hierro y manganeso en aguas del río Moquegua por las macrófitas *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor* es alta, llegando hasta un 94,71 % en un tiempo de 30 días.

**Palabras clave:** Fitorremediación, metales pesados, tratamiento, *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor*.

## ABSTRACT

The objective of this research work was to evaluate two plant species in the phytoremediation of heavy metals in the Moquegua river. The vegetal species that were used were *Eichhornia crassipes* and *Lemna minor* and the metals evaluated were aluminum, boron, iron and manganese. The completely randomized design (DCA) was used with four treatments and two repetitions. For the sample taking of the tributary (income) and effluent (output) of the treatments that were applied, was according to the National Protocol for Monitoring the Quality of Surface Water Resources. The experiment began with the derivation of water from the river to a phytoremediation pond, then the species were propagated for a period of 60 days, with the entire surface covered; Subsequently, the plant species were subjected to four treatments (times): 0, 10, 20 and 30 days, with water from the Moquegua River, taking samples in the tributary (treatment 0) and in the effluents of the treatments (10, 20 and 30 days) for chemical analysis in the laboratory through atomic absorption spectrophotometry. It was found that after 10 days it was possible to obtain an aluminum removal in the water of 84.99%, and after 30 days (final tributary) a removal of 90.41% was achieved; for boron after 10 days a removal of 84.98% was achieved, and after 30 days an 88.64% was achieved; As for iron at 10 days, it is possible to obtain a removal of 86.24%, and at 30 days 89.33%; finally, for manganese at 10 days a removal of 85.79% was achieved, and at 30 days a 94.71% was achieved. In conclusion, it was found that the removal capacity of heavy metals such as aluminum, boron, iron and manganese in waters of the Moquegua River by macrophytes *Eichhornia crassipes* and *Lemna minor* is high, reaching up to 94.71% in a time of 30 days.

**Key words:** Phytoremediation, heavy metals, treatment, *Eichhornia crassipes* and *Lemna minor*.

## INTRODUCCIÓN

La crisis hídrica mundial va en aumento y amenaza la seguridad, estabilidad y el desarrollo sostenible de los países en vías de desarrollo. Millones de personas mueren cada año por causa de enfermedades que tienen su origen en el agua, mientras que la contaminación hídrica y la destrucción de los ecosistemas van en aumento, particularmente en las zonas en desarrollo.

Actualmente las tecnologías para mejorar la calidad de los recursos hídricos son convencionales, se realizan con la aplicación de tratamientos fisicoquímicos; donde el aumento de los costos y la limitada eficacia han estimulado el desarrollo de nuevas tecnologías. Por lo que, la fitorremediación representa una alternativa sustentable y de bajo costo para la rehabilitación de ambientes afectados por contaminantes naturales y antropogénicos.

La fitorremediación es una tecnología biológica emergente que utiliza las plantas y los microorganismos asociados a la rizósfera, para remover, transformar o contener sustancias contaminantes localizadas en suelos, sedimentos, acuíferos, cuerpos de agua e incluso de la atmósfera. Esta tecnología ambiental ha experimentado un crecimiento acelerado durante la última década (Weiss et al., 2006).

La fitorremediación es una tecnología *in situ* no destructiva y de bajo costo y ha adquirido auge por ser un procedimiento pasivo, estéticamente agradable, útil para remediar simultáneamente una gran variedad de contaminantes, ya que utiliza los organismos naturales y preserva el estado natural del medio ambiente.

El río Moquegua, representa para el departamento de Moquegua, la fuente de agua que abastece a la población en sus diferentes necesidades, domésticas y económicas, y juega un rol muy importante en la protección del ecosistema de la zona, en el cuidado de la flora y fauna natural y del paisaje; sin embargo, la alteración de la calidad actual de las aguas de los afluentes que aportan al río,

constituye un problema serio de afectación de tipo local y regional, por la presencia de metales pesados de origen natural o antrópico.

En el presente estudio que se describe, evalúa dos especies vegetales en la fitorremediación de metales pesados al agua del río Moquegua

**CAPÍTULO I**  
**PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**



### **1.1. Caracterización de la realidad problemática**

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2015) el 40 % de las enfermedades son por causa ambiental. Asimismo, indica que 13 millones mueren anualmente por contaminación ambiental que representa el 25 % del total.

Entre los grandes problemas ambientales que tenemos en la actualidad es la contaminación de agua que puede provenir de fuentes naturales (como, por ejemplo, la ceniza de un volcán), sin embargo la mayor parte de la contaminación actual proviene de actividades humanas (antrópico), haciendo que toda o parte sea inadecuada para el consumo humano o como soporte de vida para plantas y animales.

El río Moquegua, representa para el departamento, la fuente de agua que abastece a la población y juega un rol muy importante en la protección del ecosistema, en el cuidado de la flora y fauna, y del paisaje de Moquegua. La alteración de la calidad actual de sus aguas constituye un problema, por la presencia de compuestos y elementos químicos de origen natural o antrópico este último debido principalmente a los lixiviados de las operaciones que realiza el hombre en la explotación de los recursos naturales los cuales drenan hacia las quebradas, lagos, lagunas, etc. (ANA, 2012 y MINAGRI, 2015).

Asimismo, según la Gobierno Regional de Moquegua (2012) indica que en época de estiaje, la calidad de agua superficial de la cuenca del río Moquegua se ve afectada por la presencia de algunos metales como hierro, aluminio, boro, y manganeso que sobrepasan los estándares nacionales de calidad ambiental para aguas (ECA), categoría 1: Agua para uso poblacional y recreacional, establecidos por la normatividad vigente.

También el ANA (2012a, 2012b, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017a y 2017b), en los monitoreos de la calidad de agua superficial de la cuenca del río Moquegua-llo, indica que algunos metales como hierro, aluminio, boro, y manganeso, en algunos puntos de monitoreo y en algunas épocas del año, sobrepasan los

estándares nacionales de calidad ambiental para aguas (ECA), categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales, establecidos por el Decreto Supremo 004-2017-MINAM.

Los metales como el arsénico, boro, cadmio, mercurio y otros tienen efectos tóxicos sobre las células del ser humano ya que tienen efecto acumulativo y pueden producir cáncer (OMS, 2015).

Actualmente los tratamientos para mejorar la calidad del agua son convencionales, se realizan con la aplicación de reactivos químicos con la finalidad de precipitar a los metales; teniendo un alto costo económico y ambiental.

En el país, existen pocos estudios realizados para el tratamiento biológico; a pesar de ser una tecnología alternativa, sustentable y de bajo costo. Asimismo, no es conveniente la aplicación de procesos usados en otras partes, ya que las condiciones siempre son diferentes unas a otras.

Por lo que existe la necesidad de investigar las técnicas para el tratamiento biológico para la remoción de metales pesados con la finalidad de que los resultados puedan implementarse para mejorar la calidad de las aguas superficiales del río Moquegua.

Por lo que en el presente trabajo se evaluó al Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) y la Lenteja de agua (*Lemna minor*) como tratamiento biológico para la fitorremediación de metales pesados en aguas del río Moquegua.

## **1.2. Formulación del problema**

### **1.2.1. Problema general**

**1.2.2.** ¿Será posible realizar la fitorremediación de metales pesados al agua del río Moquegua utilizando dos especies vegetales?

### **1.2.3. Problemas específicos**

- ¿Cuál será el contenido de metales pesados del agua en el río Moquegua previo a la fitorremediación con dos especies vegetales?
- ¿Se podrá realizar la fitorremediación de metales pesados al agua del río Moquegua utilizando dos especies vegetales?
- ¿Cuál será el contenido de metales pesados del agua del río Moquegua posterior a la fitorremediación con dos especies vegetales?

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo general**

- Evaluar dos especies vegetales en la fitorremediación del agua con metales pesados en el río Moquegua.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Analizar el contenido de metales pesados al agua del río Moquegua previo a la fitorremediación con dos especies vegetales.
- Realizar la fitorremediación de metales pesados al agua del río Moquegua utilizando dos especies vegetales.
- Analizar el contenido de metales pesados al agua del río Moquegua posterior a la fitorremediación con dos especies vegetales.

## **1.4. Justificación**

### **1.4.1. Práctica**

El estudio trata de brindar una tecnología alternativa sustentable y eficiente para descontaminar los metales pesados en el río Moquegua, permitiendo un desarrollo sostenible; además, permite obtener agua de mejor calidad a bajo costo, debido a que no requiere de personal especializado para su manejo ni consumo de energía; trayendo como consecuencia un menor contenido de metales pesados en el río Moquegua lo que permitirá a la población, los animales y las plantas, hacer uso de una mejor calidad de agua y mejorar así la calidad de vida.

### **1.4.2. Teórica**

La fitorremediación es una tecnología sostenible que se fundamenta en la utilización de plantas para reducir *in situ* o *ex sito* la concentración o peligrosidad de contaminantes orgánicos e inorgánicos de suelos, sedimentos, agua y aire, a partir de procesos bioquímicos desarrollados por las plantas y microorganismos asociados al sistema radicular y que conducen a la reducción, mineralización, degradación, volatilización, estabilización, etc. de los diversos tipos de contaminantes.

### **1.4.3. Metodológica**

La fitorremediación es una tecnología de costo mínimo, debido a que no requiere de infraestructura sofisticada; asimismo puede implementarse *in situ* y *ex sito* para remediar grandes extensiones de áreas contaminadas o para tratar grandes volúmenes de aguas diluidas, es decir, con bajas concentraciones de contaminantes. En general, es una tecnología de bajo costo, simple, sostenible, amigable con el medio ambiente y estéticamente más agradable que las tecnologías convencionales.

## **1.5. Importancia**

La población beneficiaria son todos los habitantes de la cuenca del río Moquegua; asimismo todos los animales y las plantas.

En el presente se enfrenta un nuevo reto que pasa por convencer poco a poco a las empresas y a los organismos oficiales del potencial de la fitorremediación. En algunos países se puede ya afirmar sin lugar a dudas que la fitorremediación, que una vez fue una técnica marginal y que generaba demasiadas dudas, ha pasado a ser una verdadera industria.

La principal ventaja de los sistemas de tratamiento con plantas acuáticas es su bajo costo de construcción y mantenimiento, así como su simplicidad de operación. Además, se utiliza un recurso disponible.

Comparativamente, es económica y, al tratarse de un proceso natural, suele tener aceptación por parte de la opinión pública.

Es el método menos destructivo, ya que utiliza los organismos naturales y preserva el estado natural del medio ambiente (en comparación con el uso de procesos químicos, no hay ningún impacto negativo en la fertilidad de la tierra).

### **1.6. Limitaciones**

No se han encontrado antecedentes de trabajos realizados que refieran este tema en Moquegua.

**CAPÍTULO II**  
**FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

## 2.1. Marco referencial

### 2.1.1. Antecedentes de la investigación

#### 2.1.1.1. Internacionales

Olguín y Hernández (1998) indican que las características que deben contar las plantas acuáticas usadas para el tratamiento de las aguas residuales son las siguientes: alta productividad, alta eficiencia de remoción de nutrientes y contaminantes, alta predominancia en condiciones naturales adversas y fácil cosecha. *Lemna minor* cumple con todas estas características y gracias a esto ha sido empleada en sistemas de descontaminación de aguas.

Roldán y Álvarez (2002) indican que en la fábrica de Imusa SA, localizada en el municipio de Rionegro (Antioquia-Colombia), se tienen operando desde 1988 unos canales sembrados con *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua), donde se ha comprobado una eficiencia de remoción de los diferentes contaminantes que alcanza más de 97 % en los metales pesados y hasta el 98 % en sólidos suspendidos.

Zayed (1998) citado por Aroyave (2004) investigó el potencial de la Lenteja de agua para acumular cadmio, cromo, cobre, níquel, plomo y selenio. Los resultados demostraron que, en condiciones experimentales de laboratorio, la planta resultó ser un buen acumulador de Cd, Se y Cu, un acumulador moderado de Cr y pobre acumulador de Ni y Pb. Las concentraciones más altas de cada elemento acumulada en los tejidos de la lenteja de agua fueron de 13,3 g Cd/kg, 4,27 g Se/kg, 3,36 g Cu/kg, 2,87 g Cr/kg, 1,79 g Ni/kg y 0,63 g Pb/kg. Se concluye en el estudio que la Lenteja de agua tiene un buen potencial para la remoción de cadmio, selenio y cobre de aguas residuales contaminadas con estos elementos, ya que puede acumular concentraciones altas de ellos. Su rápido crecimiento la hace una planta apropiada para actividades de fitorremediación.

Aroyave (2004) indica que la *Lemna minor* en el campo ambiental, se puede considerar como una especie valiosa en el tratamiento de aguas residuales, en

la absorción de contaminantes, como complemento alimenticio para animales domésticos y para utilizarla en bioensayos con el fin de determinar el efecto negativo de sustancias tóxicas en el agua.

Carrión et al. (2012) estudió el potencial del Jacinto de agua como planta acumuladora de metales para los canales de Xochimilco - México. Para ello se realizaron análisis estadísticos comparando las concentraciones de metales en la raíz y en la parte aérea; también se calcularon los coeficientes de translocación y de bioacumulación. Se recolectó Lirio acuático de canales en zonas con actividades turística, agrícola y urbana. Después de la digestión ácida de las muestras se cuantificaron las concentraciones de 14 metales y un metaloide (As) en la estructura aérea y sumergida del vegetal. La estructura sumergida acumuló mayores concentraciones de metales que la parte aérea, excepto para el Sr. Los coeficientes de bioacumulación mostraron que el Jacinto de agua de Xochimilco-México, se podría utilizar como planta remediadora de metales, lo cual requiere retirar periódicamente el Lirio de los canales.

Atehortua y Gartner (2013) en un estudio de la biomasa seca de *Eichhornia crassipes* como adsorbente de plomo y cromo en aguas, indican que esta planta puede ser también benéfica, pues se ha utilizado en procesos de fitorremediación por su carácter altamente hidrofílico que la convierte en un buen adsorbente. Además su biomasa seca puede utilizarse en productos artesanales o para la generación de biocombustibles. En esta investigación se estudió la planta seca y triturada como material adsorbente de metales pesados en aguas residuales, específicamente de plomo y cromo. Se encontró que este material es un adsorbente eficaz de metales pesados dado que pudo adsorber plomo y cromo de soluciones. Se concluye que la biomasa de la *E. crassipes* puede ser usada eficientemente como material adsorbente para descontaminación de aguas residuales.



### **2.1.1.2. Nacionales**

García (2012) realizó la tesis “Comparación y evaluación de tres plantas acuáticas para determinar la eficiencia de remoción de nutrientes en el tratamiento de aguas residuales domésticas”, la investigación se realizó en la PTAR-CITRAR en Lima, teniendo como objetivos determinar si el sistema de reactores con plantas acuáticas remueve nutrientes y observar si es un sistema adecuado y complementario con las plantas de tratamiento de aguas residuales convencionales existentes en nuestro país, determinar las eficiencias o porcentajes de remoción, principalmente de nutrientes de aguas residuales domésticas del efluente de la laguna terciaria; mediante el cultivo de plantas acuáticas *Lemna minor* (Lenteja de agua) y *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua) en un sistema de planta piloto y evaluar las mejores condiciones ambientales, características fisicoquímicas y bacteriológicas para una eficiente remoción de los principales contaminantes de las aguas residuales domésticas, mediante la concentración de las capacidades depuradoras de las plantas acuáticas; *Lemna minor* y *Eichhornia crassipes* y este estudio buscó mejorar más la calidad del efluente de CITRAR (Lima-Perú), planta de tratamiento de aguas residuales utilizando macrófitas o plantas acuáticas. En este estudio realizado se observó que fue posible remover los nutrientes a un 90 % como se esperaba, pues estudios recientes hechos en el Perú y en América Latina que señalan eficiencia promedio del 95 %. Sin embargo se determinó como mejor tratamiento a *Eichhornia crassipes*, y en base a este resultado, esta especie se aplicó para la depuración de aguas residuales domésticas.

### **2.1.1.3. Locales**

Bedoya (2012) realizó un trabajo de investigación denominado “Utilización del Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) para el tratamiento biológico de aguas residuales domésticas” en la ciudad de Moquegua. Utilizó el Jacinto de agua en tres tratamientos: T1=Jacinto de agua con una siembra (15 días), T2=Jacinto de agua con dos siembras (30 días) y T3=Jacinto de agua con tres siembras (45 días); todo el trabajo se realizó en condiciones controladas de vivero; siendo el agua utilizada: agua residual doméstica sedimentada; previamente

analizada en laboratorio para luego realizar las siembras en los tratamientos (T1, T2 y T3). Concluido el periodo de tiempo en cada tratamiento se realizó un análisis de laboratorio, siendo los resultados los siguientes: La remoción en el tratamiento 1 fue 41,88 % en STS; DBO=71,61 %; FT=65,28 % y en NT=36,85 %. Sin embargo en el tratamiento 3 fue de un 85 % en STS, en la DBO un 93,55 %, FT= 96,94 % y en NT un 95,12 %; convirtiéndose el uso del Jacinto de agua, en una alternativa para la descontaminación biológica de las aguas residuales domésticas en la ciudad de Moquegua.

## **2.2. Marco conceptual**

### **2.2.1. Remediación**

Se refiere a la remoción de contaminación o contaminantes del medio ambiente (suelo, aguas subterráneas, sedimento o aguas de la superficie) para la protección general de la salud humana y del ambiente, o de tierras provistas para el redesarrollo.

### **2.2.2. Biorremediación**

Es cualquier proceso que utilice microorganismos, hongos, plantas o las enzimas derivadas de ellos para retornar un medio ambiente alterado por contaminantes a su condición natural.

### **2.2.3. Fitorremediación**

Conjunto de tecnologías que utiliza las plantas para reducir, degradar o inmovilizar compuestos orgánicos contaminantes (naturales o sintéticos), de la tierra, del agua o del aire y que provienen de las actividades humanas. Esta técnica también puede tratar la contaminación por compuestos inorgánicos (metales pesados).

### **2.2.4. Remoción**

El término remoción se utiliza para hacer referencia a todo aquel acto que tenga que ver con quitar algo de su lugar. La remoción puede llevarse a cabo respecto de objetos o de elementos así como también de personas de un cargo o de un puesto en el que se encuentran normalmente.

### **2.2.5. Contaminación**

Cualquier sustancia ajena a un sistema (agua por ejemplo) que como consecuencia de una actividad humana, ingresa a él y que por su naturaleza y concentración, ejerce directa o indirectamente un efecto adverso sobre los seres vivos, que dependen del sistema. También se define como cualquier sustancia extraña de origen antrópico, capaz de romper el equilibrio natural de un ecosistema (por ejemplo ecosistema acuático).

### **2.2.6. Planta acumuladora**

Plantas que absorben y concentran en sus partes recolectables (hojas, tallos) los contaminantes contenidos en el suelo (a menudo metales pesados. Son capaces de tolerar y acumular los metales pesados. Plantas que poseen la capacidad de acumular y tolerar 10-100 veces más un determinado metal comparado con las plantas normales.

### **2.2.7. Metales pesados**

Se consideran como metales pesados a un grupo de gran importancia, ya que algunos son esenciales para las células, pero en altas concentraciones pueden resultar tóxicos para los seres vivos (humanos, organismos del suelo, plantas y animales). Los metales pesados constituyen un grupo cercano a los 40 elementos de la tabla periódica que tienen una densidad mayor o igual a 5 g/cm<sup>3</sup>. El rasgo distintivo de la fisiología de los metales pesados, es que aun cuando muchos de ellos son esenciales para el crecimiento como el Na, K, Mg, Ca, V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn y Mo, se ha reportado que también tienen efectos tóxicos sobre las células, principalmente como resultado de su capacidad para alterar o desnaturalizar las proteínas.

### **2.2.8. Fitodepuración**

La fitodepuración es la utilización de plantas verdes (macrofitas o microfitas) para depurar efluentes líquidos y/o gaseosos. La fitodepuración es por lo tanto una técnica específica de biorremediación.

## **2.3. Marco teórico**

### **2.3.1. Biorremediación**

El término biorremediación fue acuñado a principios de la década de los 80, y proviene del concepto de remediación, que hace referencia a la aplicación de estrategias físico-químicas para evitar el daño y la contaminación en suelos. Los científicos se dieron cuenta que era posible aplicar estrategias de remediación que fuesen biológicas, basadas esencialmente en la observación de la capacidad de los microorganismos de degradar en forma natural ciertos compuestos contaminantes (Atehortua y Gartner, 2013).

Entonces, la biorremediación surge como una rama de la biotecnología que busca resolver los problemas de contaminación mediante el uso de seres vivos (microorganismos y plantas) capaces de degradar compuestos que provocan desequilibrio en el medio ambiente, ya sea suelo, sedimento, fango o mar.

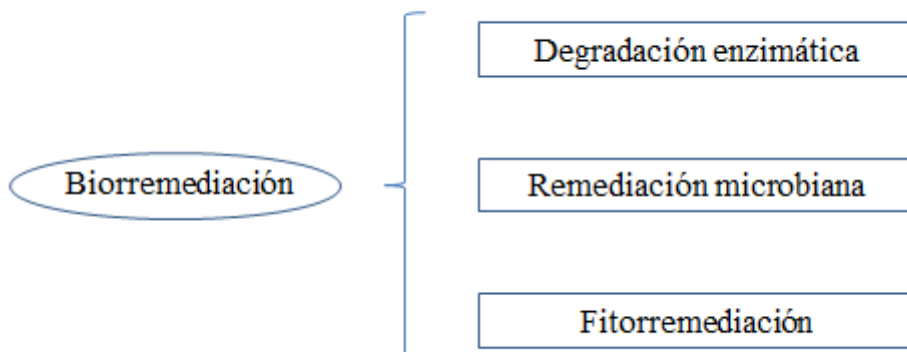
### **2.3.2. Tipos de Biorremediación**

En los procesos de biorremediación generalmente se emplean mezclas de ciertos microorganismos o plantas capaces de degradar o acumular sustancias contaminantes tales como metales pesados y compuestos orgánicos derivados de petróleo o sintéticos.

Básicamente, los procesos de biorremediación pueden ser de tres tipos (figura 1).

**Figura 1**

Tipos de biorremediación.



**Fuente:** Atehortua y Gartner, 2013.

### 2.3.3. Biorremediación y contaminación ambiental

El aumento de la población humana y el desarrollo industrial sin precedentes alcanzados durante el siglo XX, incrementaron las concentraciones de contaminantes sólidos y líquidos a niveles críticos. El manejo inadecuado de los materiales y residuos trajo como consecuencia la aparición de grandes problemas ambientales conocidos como contaminación ambiental, para los cuales ni el ambiente estaba adaptado ni la sociedad preparada. La contaminación natural es muy pequeña, en cambio la contaminación artificial, es decir aquella procedente de la actividad humana es grande, siendo tres las principales fuentes: la actividad minera, las emisiones industriales y las emisiones de vehículos. Siendo la actividad minera en nuestro país la causa principal originando la contaminación de suelos, y ríos trayendo como consecuencias graves problemas de salud en la población.

La rehabilitación de suelos contaminados y el tratamiento de diferentes residuos procedentes de la actividad minera, aplicando tecnologías inspiradas en procesos naturales, son métodos ecológicamente sustentables que minimizan el compromiso ambiental que pueden originar otros métodos de restauración y/o tratamiento, resultando ser métodos más económicos y

factibles. En consecuencia, en los últimos años ha cobrado una gran importancia la utilización de métodos biológicos para la limpieza de sitios contaminados, todos ellos agrupados en procesos de biorremediación.

#### **2.3.4. Fitorremediación**

El concepto de usar plantas para limpiar suelos contaminados no es nuevo, desde hace muchos años las plantas fueron propuestas para el uso en el tratamiento de aguas residuales. En Rusia en los años sesenta se realizaron investigaciones utilizando plantas para recuperar suelos contaminados con radionucleótidos. Existen reportes sobre el empleo de plantas acuáticas en aguas contaminadas con plomo, cobre, cadmio, hierro y mercurio. La remediación de la acumulación de metales pesados en suelos utilizando plantas es también ampliamente reconocida (Brown y Baker, 1994).

La fitorremediación es el uso de plantas para recuperar suelos contaminados, es una tecnología *in situ* no destructiva y de bajo costo y está basada en la estimulación de microorganismos degradadores (Salt y Blaylok, 1995). Consiste en el uso de plantas, sus microorganismos o enzimas asociadas, así como de la aplicación de técnicas agronómicas para degradar, retener o reducir a niveles inofensivos los contaminantes ambientales a través de procesos que logran recuperar la matriz o estabilizar al contaminante. Dentro de las técnicas de restauración de suelos afectados por la contaminación, la fitorremediación ha adquirido auge por ser un procedimiento pasivo, estéticamente agradable, útil para remediar simultáneamente una gran variedad de contaminantes (Grupo de Fitorremediación, 2007).

En estudios recientes se ha demostrado que la fitorremediación es una solución prometedora para la limpieza de sitios contaminados por una variedad de metales, aunque también tiene una serie de limitaciones (Castro De Esparza, 2006), además, es un proceso de descontaminación que involucra el empleo de plantas que pueden remover, transferir, estabilizar, descomponer y/o degradar contaminantes de suelo, sedimentos y agua, como solventes, plaguicidas, hidrocarburos poliaromáticos, metales pesados, explosivos,

elementos radiactivos, fertilizantes, para hacerlos más biodisponibles para la planta (Nuñez, 2007 y Lagrega, 1996).

La fitorremediación aplicada a suelos contaminados con elementos o compuestos inorgánicos, incluye, básicamente, tres mecanismos: la fitoextracción o fitoacumulación, la fitoestabilización y la fitovolatilización (tabla 1) (Backer, 1989 y Llumelli, 2006).

**Tabla 1***Mecanismos de fitorremediación.*

<b>Tipo</b>	<b>Proceso involucrado</b>	<b>Contaminación tratada</b>
Fitoextracción	Las plantas se usan para concentrar metales en las partes cosechables (principalmente en la parte aérea).	Cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercurio, plomo, selenio, zinc.
Rizofiltración	Las raíces de las plantas se usan para absorber, precipitar y concentrar metales pesados a partir de efluentes líquidos contaminados y degradar compuestos orgánicos	Cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercurio, plomo, selenio, zinc, isótopos radiactivos, compuestos fenólicos.
Fitoestabilización	Las plantas tolerantes a metales se usan para reducir la movilidad de los mismos y evitar el pasaje a napas subterráneas o el aire	Lagunas de desecho de yacimientos mineros. Propuesto para fenólicos y compuestos clorados.
Fitoestimulación	Se usan los exudados radiculares para promover el desarrollo de microorganismos degradativos (bacterias y hongos)	Hidrocarburos derivados del petróleo y poliaromáticos, benceno, tolueno, atrazina, etc.
Fitovolatilización	Las plantas captan y modifican metales pesados o compuestos orgánicos y los liberan a la atmósfera con la transpiración.	Mercurio, selenio y solventes clorados (tetraclorometano y triclorometano)
Fitodegradación	Las plantas acuáticas y terrestres captan, almacenan y degradan compuestos orgánicos para dar subproductos menos tóxicos o no tóxicos.	Municiones (TNT, DNT, RDX. Nitrobenceno), atrazina solventes clorados, DDT, pesticidas fosfatados, fenoles y nitrilos, etc.

**Fuente:** Tabacchi, 2014.



### **2.3.5. Fitoextracción**

La fitoextracción debe considerarse como una tecnología de largo plazo, que puede requerir de varios ciclos de cultivo para reducir la concentración de los contaminantes a niveles aceptables. El tiempo requerido depende de la concentración y tipo de contaminante(s), de la duración del periodo de crecimiento y de la eficiencia de remoción de la especie utilizada y puede tomar entre uno y 20 años (Backer, 1989 y Benavides, 2006) y constituye una alternativa económica para la eliminación de los contaminantes del suelo, que posteriormente pueden ser reciclados o vertidos de una forma segura. Se estima que el costo de las técnicas de fitorremediación, es entre 10 a 1 000 veces menor que las técnicas tradicionales (Brown y Baker, 1994; Castro De Esparza, y Mensah, 2008).

Esta técnica se encuentra todavía en su etapa inicial de investigación y de desarrollo en nuestro medio, y está surgiendo como un método de rehabilitación atractivo debido a su simplicidad además su costo es relativamente bajo (Universidad Agraria La Habana, 2007).

Entre las metodologías de limpieza para suelos contaminados por metales pesados, la técnica de fitoextracción a través de los tejidos de las plantas, presenta ventajas ecológicas y económicas. Esta opción de limpieza depende principalmente, de las condiciones del suelo y de la planta acumuladora (Backer, 1989 y Cañizares, 2008). Para mejorar el proceso de fitoextracción, la biodisponibilidad del contaminante hacia las raíces puede facilitarse a través de la adición de agentes acidificantes, de fertilizantes o quelantes (Hammett, 1928).

Todas las plantas poseen un potencial para absorber una amplia variedad de metales del suelo pero la mayor parte de las plantas tienden solamente a absorber los que son esenciales para su supervivencia y desarrollo. Existe una notable excepción de esta regla de un pequeño grupo de plantas que pueden tolerar, absorber y translocar altos niveles de ciertos metales, estas plantas reciben el nombre de hiperacumuladoras (Castro De Esparza, 2006).

### **2.3.6. Plantas hiperacumuladoras de metales pesados**

Una definición propone que si una planta contiene más de 0,1 % de Ni, Co, Cu, Cr y Pb o 1 % del Zn en sus hojas sobre una base del peso seco, ésta puede ser llamada una “hiperacumuladora”, independientemente de la concentración del metal en el suelo (Backer, 1989). De acuerdo con Terry (Trejo, 2009) las características de una planta remediadora ideal incluyen desarrollo de abundante biomasa y capacidad evidente de tolerar y acumular los contaminantes de interés.

Las primeras plantas hiperacumuladoras caracterizadas son miembros de las familias Brassicaceae y Fabaceae. El gran interés despertado por las plantas hiperacumuladoras, especialmente para destoxificar un ambiente contaminado, obliga también a resolver otros problemas relativos a otras disciplinas, considerando que cuando se intensifique la investigación conjunta de diversos campos como botánica, fisiología vegetal, agronomía, química y genética, probablemente se inicie un brillante futuro para la fitorremediación. El entorno de las plantas hiperacumuladoras revela la necesidad de impulsar mayores conocimientos multidisciplinarios que aumenten la rentabilidad y eficacia de dichas plantas: sus aplicaciones son interesantes en muchas áreas, y particularmente importantes en la protección del ambiente (Brown y Baker, 1994).

**Tabla 2**

*Número de plantas hiperacumuladoras de metales en el mundo.*

<b>Metal</b>	<b>Número de taxones</b>	<b>Número de familias</b>
Arsénico	2	1
Cadmio	2	1
Cobalto	26	11
Cobre	35	15
Plomo	14	7
Manganeso	9	5
Níquel	317	37
Selenio	20	7
Zinc	13	5

**Fuente:** Reeves y Baker, 2000.

### **2.3.7. Metales pesados en el ambiente**

Los metales pesados contribuyen fuertemente a la contaminación ambiental, la cantidad de metales disponibles en el suelo está en función del pH, el contenido de arcillas, contenido de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico y otras propiedades que las hacen únicas en términos de manejo de la contaminación (Núñez, 2007). Además son definidos como elementos con propiedades metálicas (conductibilidad, ductilidad, etc.), número atómico mayor de 20, y cuya densidad es mayor a los 5 g/cm<sup>3</sup>. Se consideran metales pesados el plomo cadmio, cromo, mercurio, zinc, cobre, plata y arsénico, constituyen un grupo de gran importancia, ya que algunos son esenciales para las células, pero en altas concentraciones pueden resultar tóxicos para los seres vivos, tales como humanos, organismos del suelo, plantas y animales (Salt y Blaylok, 1995).

Estos contaminantes pueden alcanzar niveles de concentración que provocan efectos negativos en las propiedades físicas, químicas y biológicas como: reducción del contenido de materia orgánica, disminución de nutrientes, variación del pH generando suelos ácidos, amplias fluctuaciones en la

temperatura, efectos adversos en el número, diversidad y actividad en los microorganismos de la rizósfera, dificultan el crecimiento de una cubierta vegetal protectora favoreciendo la aridez, erosión del suelo, y la dispersión de los contaminantes hacia zonas y acuíferos adyacentes y como consecuencia aumenta la vulnerabilidad de la planta al ataque por insectos, plagas y enfermedades, afectando su desarrollo (Mensah, 2008). Las principales fuentes de metales pesados son actividades naturales, como desgastes de cerros, volcanes, que constituyen una fuente relevante de los metales pesados en el suelo, así como también actividades antropogénicas como la industria minera que está catalogada como una de las actividades industriales más generadora de metales pesados. En el suelo, los metales pesados, están presentes como iones libres, compuestos metálicos solubles, compuestos insolubles como óxidos, carbonatos e hidróxidos (Pastor, 2006).

Dentro de los metales pesados hay dos grupos; oligoelementos o micronutrientes que son requeridos en pequeñas cantidades o cantidades traza por plantas y animales y necesarios para que los organismos completen su ciclo vital. Pasado cierto umbral se vuelven tóxicos entre ellos están: el As, B, Co, Cr, Cu, Mo, Mn, Ni, Fe, Se y Zn y los metales pesados sin función biológica conocida, cuya presencia en determinadas cantidades en seres vivos lleva a la aparición de alteraciones en el funcionamiento de su organismo. Resultan altamente tóxicos y presentan la propiedad de acumularse en los organismos vivos: el Cd, Hg, Pb, Sb, Bi, Sn, Ti (García y Dorronsorco, 2005).

### **2.3.8. Aguas del río Moquegua**

La cuenca del río Moquegua antes de la operación del embalse Pasto Grande disponía de una exigua disponibilidad de recursos hídricos, y un déficit hídrico importante frente a una creciente demanda de agua. Tres afluentes principales conforman la cuenca del río Moquegua: Huracane, Otorá y Tumilaca. En el año 1989 se culminó la ejecución de la presa Pasto Grande, la cual empezó a embalsar las aguas del río Vizcachas, operando a partir de abril de 1995. El embalse de Pasto Grande, destinado principalmente para servir de fuente de abastecimiento para la producción de agua potable para las ciudades de Ilo y

Moquegua, se encuentra contaminado, por sus principales afluentes, como el río Millojahuirá, que ingresa al embalse con una acidez producida por la contaminación antrópica; de los ríos Antajarane y Patara que igualmente ingresan al embalse con una acidez originada principalmente por la actividad minera que generan efluentes contaminados con minerales y por los pasivos ambientales mineros; además tenemos el afluente del río Tocco, que presenta una carga bacteriana originada por contaminación fecal doméstica y que contribuye con la contaminación del embalse, incrementando además la carga de DBO; todo esto ha contribuido a la disminución de la biodiversidad (no existen peces ni organismos vivos de tamaño apreciable) y la aparición de especies resistentes a los factores mencionados, como la presencia de algunas especies de cianobacterias que son tóxicas especialmente para el consumo humano, y de algunas especies de algas microscópicas también tóxicas para la biota (ejemplo *Gimnodinium* sp) (Proyecto Especial Regional Pasto Grande [PERPG], 2015).

De todas maneras, al tratarse de agua de fuente para abastecimiento público y para riego, es necesario que se tomen algunas medidas que minimicen los riesgos tanto para el consumo humano, como para la biota, y realizar las mejoras que permitan el retorno de las especies más representativas de la región a fin de recuperar el ecosistema, además que se de las recomendaciones a las empresas mineras que contaminan el tratamiento de sus efluentes antes de ser vertidos a los ríos; todo esto repercutirá en la mejora de la calidad de vida de las poblaciones servidas, así como de las actividades económicas conexas (PERPG, 2015).

El ANA (2012a y 2012b), en el informe e interpretación de resultados del I y II monitoreo participativo de la calidad, en lo correspondiente, a las aguas superficiales del río Moquegua, reportó en dos y cuatro puntos de monitoreo, respectivamente, que las aguas muestran características propias de ambientes con material volcánico y sedimentario por mostrarse el parámetro boro (B) en concentraciones que superan al valor de los ECA para agua categoría 3, respectivamente y conforme el río se desplaza el boro aumenta. Así como

concentraciones de calcio y sodio excediendo al ECA para agua en otro punto de monitoreo. En el (2013) se realizó el III monitoreo participativo de la calidad de agua superficial del río Moquegua, se reportó en dos puntos de monitoreo la presencia de nitratos que sobrepasan los valores del ECA para agua categoría 3; asimismo, en un punto de monitoreo se reportó presencia de coliformes termotolerantes que superan los valores del ECA para agua categoría 3. En el año 2014 se realizó el IV monitoreo participativo de la calidad de agua superficial del río Moquegua (abril, 2014), donde se reportó en tres puntos de monitoreo la presencia boro (B) en concentraciones que superan al valor de los ECA para agua categoría 3; asimismo, en un punto se reportó presencia de hierro (no cumplen con el rango establecido en el ECA para agua en la categoría 3) y de coliformes termotolerantes que superan los valores del ECA para agua categoría 3. En el año 2015, se realizó el V monitoreo participativo de la calidad de agua superficial del río Moquegua (setiembre, 2014), donde se reportó en un punto de monitoreo, presencia de calcio, conductividad eléctrica, sulfatos y boro, que no cumplen con los valores establecidos en el ECA para agua categoría 3, solo para riego de vegetales, encontrándose apta para bebida de animales, con excepción del parámetro sulfatos. En el año 2016, se realizó el VII monitoreo participativo de la calidad de agua superficial del río Moquegua (octubre, 2015), donde se reportó en tres puntos diferentes la presencia de boro, DBQ, nitratos, fosfatos y conductividad eléctrica, los cuales incumplieron con los ECA-agua, categoría 3. En el año 2017 en los resultados del monitoreo participativo de la calidad de agua superficial de la cuenca del río Moquegua-Ilo (setiembre 2016), se reporta, que en general, los recursos hídricos que conforman el sistema hidráulico de derivación, clasificados en la categoría 3, los parámetros que transgredieron los ECA-agua, fueron: pH, aluminio, boro y manganeso, de acuerdo a los informes de ensayo con valor oficial emitido por el laboratorio NSF Envirolab SAC. Finalmente, en los resultados del IX monitoreo participativo de la calidad de agua superficial de la cuenca del río Moquegua-Ilo (noviembre 2016), de la evaluación realizada a los cuerpos naturales de agua superficial, y comparado con los Estándares de Calidad Ambiental – Agua (ECA), se reporta que no cumplen el algunos puntos de monitoreo (parámetros que transgreden los ECA-agua) con boro,

manganeso, pH, aluminio, coliformes termotolerantes, conductividad eléctrica, cloruros y E. coli.

### **2.3.9. Situación de las aguas del embalse Pasto Grande**

El problema existente en el embalse Pasto Grande, surge de una serie de análisis de la calidad de agua realizados en los laboratorios del Ministerio de Salud (MINSA) periodo 2004-2007, además de análisis en laboratorios privados, los cuales han arrojado altas concentraciones de hierro (Fe), manganeso (Mn) y una elevada acidez (pH) del agua del embalse. Los resultados volvieron a ser comprobados posteriormente, luego de la aparición de manchas rojizas a café-amarillentas en diferentes áreas del embalse de Pasto Grande (PERPG, 2015).

El PERPG (2006), en su informe técnico indica, que se produce una mortandad de alevinos de trucha de la empresa comunal de producción y servicios Lago Azul en el embalse Pasto Grande, lo cual alertó a las autoridades del departamento de Moquegua a realizar un monitoreo de la calidad de las aguas del embalse, a fin de poder determinar la causa de la mortandad de los peces. El PERPG, la Dirección Regional de Producción-Ilo (DIREPRO-Ilo) y la Gerencia Regional de Recursos Naturales y Gestión del Medio Ambiente (GRRRNN) del Gobierno Regional Moquegua, conformaron una Comisión Técnica Multisectorial encargada del Monitoreo de las aguas del embalse de Pasto Grande, que permita analizar y estudiar el problema suscitado (PERPG, 2015).

El ANA (2012a, 2012b, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017a y 2017b), en los monitoreos de la calidad de agua superficial de la cuenca del río Moquegua-Ilo, indica que los ríos Millojahuirá, Antajarane y Patara soportan descargas de afluentes mineros.

El PERPG, en febrero del año 2008 informa que se da la presencia de un nuevo fenómeno en el embalse Pasto Grande, de acuerdo a la evaluación

preliminar realizada se determinó la presencia de la gran cantidad de minerales y la multiplicación y desarrollo y desordenado de micro organismos, fenómeno conocido como florecimiento micro algas. A partir de esta fecha no fue posible profundizar estudios de evaluación debido a la falta de disponibilidad presupuestal en este rubro y/o componente (PERPG, 2015).

El principal problema identificado es la “Inadecuada calidad de las aguas del embalse Pasto Grande”; aguas que son utilizadas por la población de Moquegua para el consumo humano y para sus actividades económicas.



**CAPÍTULO III**  
**PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO**

### **3.1. Metodología**

#### **3.1.1. Método**

##### **3.1.1.1. Ubicación geográfica**

El departamento de Moquegua se encuentra ubicado en el territorio peruano en la parte Sur Occidental del Perú entre las coordenadas geográficas de 15°57' y 17°53' de latitud Sur 70°00' y 71°23' de longitud de Greenwich. Tiene una superficie territorial de 16 174,65 km<sup>2</sup>, representando el 1,22 % a nivel del territorio nacional y con una densidad poblacional del 9,42 (hab/km<sup>2</sup>) correspondiente al año 2017.

El trabajo de investigación se realizó en el fundo Yaravico, ubicado en el sector de Santa Rosa; km 2, Valle de Moquegua, ciudad de Moquegua; siendo las coordenadas geográficas, según el Senamhi Moquegua entre: 17° 11' 39" de latitud y 70° 57' 48" de longitud oeste del meridiano de Greenwich, y la coordenada UTM Datum WGS 84, este 291015.16, norte 8097137.72, y la altura es de 1210 msnm (anexo 2).

##### **3.1.1.2. Procedimiento para la toma de muestras**

Para la toma de muestra del afluente (ingreso) y efluente (salida) de los tratamientos que se aplicaron fue de acuerdo al Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales (Resolución Jefatural N° 010-2016-ANA). Siendo el siguiente:

Dada la naturaleza del experimento se trabajó con dos muestras simples o discretas por tratamiento. En cada muestra se tomó una porción de agua en un punto o lugar determinado y a la mitad de la columna de agua de la poza de tratamiento, para su análisis individual en el laboratorio. Las muestras se recogieron en una balde, donde previamente se realizó un enjuague por dos oportunidades, posteriormente fueron depositadas en los recipientes (frascos) de polietileno de alta densidad (PE-HD), los mismos que previamente fueron preparados con agua desionizada y enjuagados con agua destilada. Para el caso de la evaluación del pH y la conductividad eléctrica, esta se hizo *in situ*, para cual se utilizó un multiparámetro de lectura directa.

Los recipientes fueron rotulados con etiquetas autoadhesivas, en la que se consignó la siguiente información:

- Nombre del solicitante
- Código del punto de muestreo
- Tipo de cuerpo de agua (agua continental)
- Fecha y hora de muestreo
- Nombre del responsable de la toma de muestra
- Tipo de análisis requerido
- Preservación y tipo de reactivo (acidificación del pH entre 1 y 2 con HNO<sub>3</sub>)

Se hizo el llenado de la cadena de custodia, con la siguiente información

- Nombre del responsable que realiza el monitoreo
- Nombre de la persona, correo electrónico, número telefónico del responsable de la toma de muestras
- Nombre del proyecto y/o monitoreo
- Código del punto de monitoreo o muestra
- Clasificación de la matriz de agua (agua de río)
- Fecha y hora del muestreo
- Número y tipo de envases por punto de muestreo
- Preservación de la muestra
- Lista de parámetros a analizar por cada muestra
- Firma de la persona responsable del monitoreo
- Observaciones en campo, como condiciones climáticas particulares, anomalías organolépticas del agua, actividades o condiciones insólitas en el lugar del monitoreo

Las muestras fueron acondicionadas, en forma vertical, y trasladadas en una caja térmica (cooler) a una temperatura de 5° C, donde para mantener la temperaturas se utilizó bolsas herméticas de hielo.

### **3.1.2. Tipo de la investigación**

Aplicada porque se ha tomado un problema actual, creciente y global de contaminación de los recursos hídricos, generalmente provocada por el ser humano, que la vuelve impropia o peligrosa para el consumo humano, la industria, la agricultura, la pesca y las actividades recreativas, así como para los animales y la vida natural. Se pretende generar una alternativa de solución utilizando tecnologías limpias.

### **3.1.3. Nivel de la investigación**

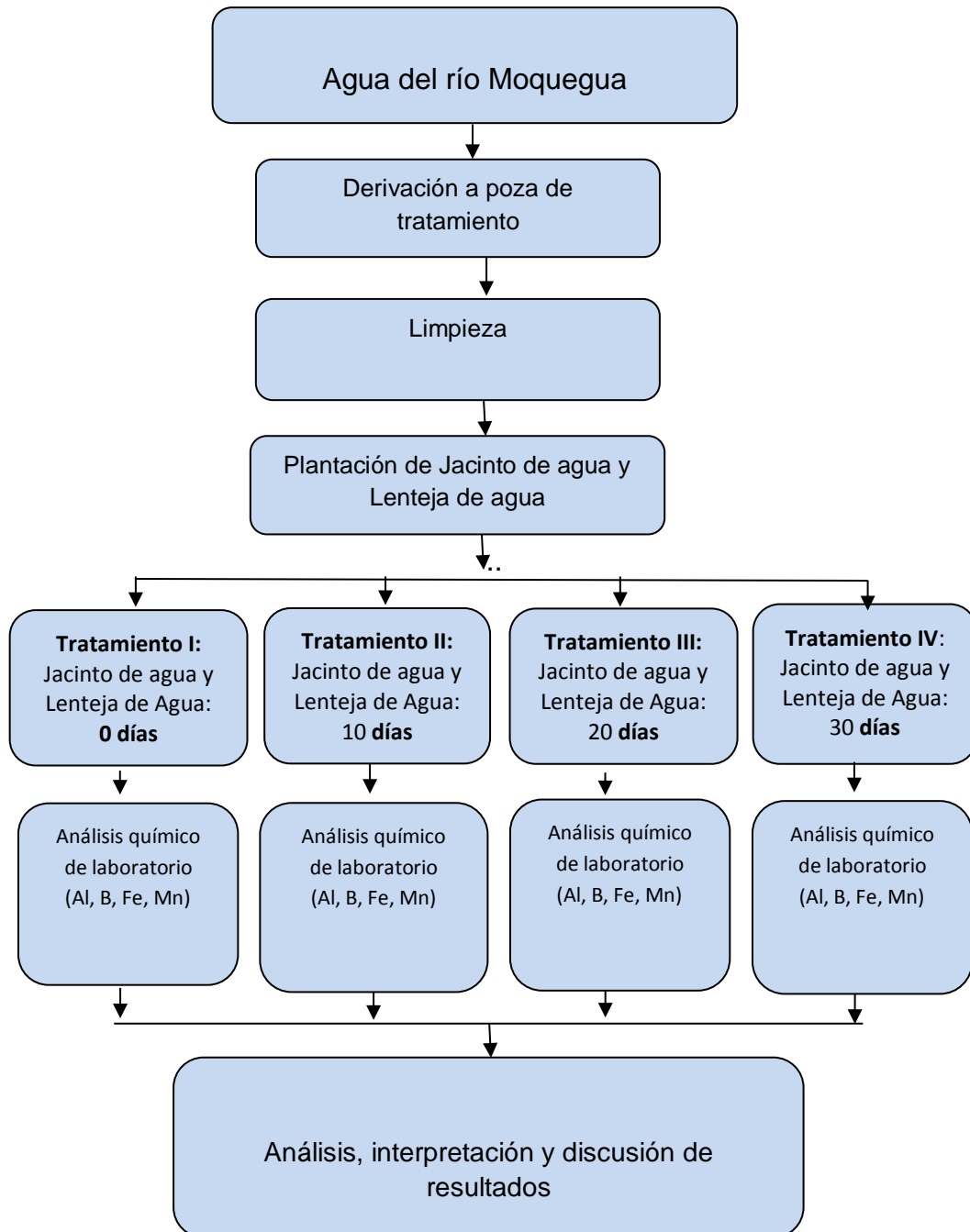
Experimental porque se manipuló la variable independiente, como fueron las dos especies vegetales (Jacinto de agua y la Lenteja de agua), para la fitorremediación de metales pesados en las aguas del río Moquegua. Se evaluó el efluente y los afluentes de cada tratamiento estudiado.

## **3.2. Diseño de la investigación**

En la figura 2 se observa el esquema experimental de la investigación que se siguió:

Figura 2

Esquema experimental.



Fuente: Elaboración propia.

### **3.3. Hipótesis de la investigación**

#### **3.3.1 Hipótesis general**

- La capacidad de dos especies vegetales para la fitorremediación de metales pesados en aguas del río Moquegua es alta.

#### **3.3.2 Hipótesis específicas**

- Es posible analizar el contenido de metales pesados al agua del río Moquegua al inicio del proceso fitorremediación con dos especies vegetales.
- Con la utilización de dos especies vegetales se logra fitorremediar significativamente el agua con metales pesados en el río Moquegua.
- Es posible analizar el contenido de metales pesados al agua del río Moquegua al final del proceso de fitorremediación con dos especies vegetales.

### **3.4. Variables**

#### **3.4.1. Variable independiente: Especies vegetales**

Indicadores: Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*)  
Lenteja de agua (*Lemna minor*)

#### **3.4.2. Variable dependiente: Calidad de agua**

Indicadores: Aluminio, boro, hierro y manganeso

#### **3.4.3. Variable interviniente: Fitorremediación**

#### **3.4.4. Operacionalización de variables**

**Tabla 3***Operacionalización de variables.*

<b>Variable</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Indicadores</b>	<b>UM</b>	<b>Instrumentos</b>
Independiente	Especies vegetales	Jacinto de agua	Plantas/m <sup>2</sup>	Conteo manual
		Lenteja de agua	Plantas/m <sup>2</sup>	Conteo manual
Dependiente	Calidad de agua	Aluminio	mg/L	Espectrofotometría
		Boro	mg/L	Espectrofotometría
		Fierro	mg/L	Espectrofotometría
		Manganeso	mg/L	Espectrofotometría
Interviniente	Fitorremediación	Tiempos	0 días	Conteo
			10 días	Conteo
			20 días	Conteo
			30 días	Conteo

**Fuente:** Elaboración propia.

### **3.5. Cobertura del Estudio**

#### **3.5.1. Población**

El río Moquegua se forma por los aportes de tres ríos principales, el Huaracane, el Torata y el Tumilaca los cuales se unen en forma sucesiva a la altura de la ciudad de Moquegua, drenando una cuenca de 3 604,75 km<sup>2</sup>, la misma que cuenta con una zona imbrífera de 680 km<sup>2</sup> ubicada sobre los 3900 msnm (ALA Moquegua, 2015)

Desde su origen en la parte alta, hasta su desembocadura en el mar, el río Moquegua recorre aproximadamente 69 km aguas abajo del valle de Moquegua, el cauce se encañona y reconoce como río Osmore, para finalmente ser reconocido como río Ilo, hasta desembocar en el Océano Pacífico.

### **3.5.2. Muestra**

Se construyó una poza de concreto (piedra, arena y cemento), con las siguientes dimensiones (1m de ancho, 1 m de profundidad, por 5 m de largo), con un costo aproximado de S/ 350.00.

Luego se plantó y cultivó el Jacinto de agua y la Lenteja de agua por un espacio de 60 días, hasta que toda la poza estuvo cubierta por las especies en la parte superior (superficie del agua), cuya población, en promedio, de plantas de Jacinto de agua fue de 15 a 20 plantas/m<sup>2</sup> y de Lenteja de agua fue de 10 000 a 15 000 plantas/m<sup>2</sup>.

Se recogieron por el lapso de cinco (05) días aguas del río Moquegua. Posteriormente se homogenizó el agua para iniciar con la aplicación de los tratamientos de estudio.

### **3.5.3. Muestreo**

Aleatorio

## **3.6. Técnicas e instrumentos**

### **3.6.1. Técnicas de la investigación**

#### **3.6.1.1. Procedimiento**

Una vez derivada el agua del río Moquegua a la poza de fitorremediación, se limpió de elementos extraños; luego se procedió a propagar el Jacinto de agua y la Lenteja de agua. Posteriormente se aplicaron los tratamientos de estudio de la siguiente manera:

- Tratamiento 1 (Jacinto de agua y Lenteja de agua: 0 días). Una vez plantada con el Jacinto de agua y la Lenteja de agua la poza, se tomó submuestras para consolidar la muestra final y enviar al laboratorio para el análisis químico correspondiente.
- Tratamiento 2 (Jacinto de agua y Lenteja de agua: 10 días). Pasado los 10 días de tratamiento, se tomó submuestras para consolidar la muestra final y enviar al laboratorio para el análisis químico correspondiente.



- Tratamiento 3 (Jacinto de agua y Lenteja de agua: 20 días). Pasado los 20 días de tratamientos, se tomó submuestras para consolidar la muestra final y enviar al laboratorio para el análisis químico correspondiente.
- Tratamiento 4 (Jacinto de agua y Lenteja de agua: 30 días). Pasado los 30 días de tratamiento se tomó submuestras para consolidar la muestra final y enviar al laboratorio para el análisis químico correspondiente

### **3.6.1.2. Análisis químico**

- **Determinación del aluminio**

A través de la espectrofotometría de absorción atómica en base a protocolos por la AOAC (Asociación de Químicos Analíticos Oficiales) y la USEPA (Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos). Se emplearon estándares certificados y cada muestra fue corrida por duplicado.

- **Determinación del boro**

A través de la espectrofotometría de absorción atómica en base a protocolos por la AOAC (Asociación de Químicos Analíticos Oficiales) y la USEPA (Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos). Se emplearon estándares certificados y cada muestra fue corrida por duplicado.

- **Determinación del hierro**

A través de la espectrofotometría de absorción atómica en base a protocolos por la AOAC (Asociación de Químicos Analíticos Oficiales) y la USEPA (Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos). Se emplearon estándares certificados y cada muestra fue corrida por duplicado.

- **Determinación del manganeso**

A través de la espectrofotometría de absorción atómica en base a protocolos por la AOAC (Asociación de Químicos Analíticos Oficiales) y la USEPA (Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos).

Unidos). Se emplearon estándares certificados y cada muestra fue corrida por duplicado.

### **3.6.2. Instrumentos de la investigación**

#### **3.6.2.1. Materiales**

- Poza para almacenamiento de agua
- Agua del río Moquegua
- Macrofitas: Jacinto de agua y Lenteja de agua
- Libreta de campo
- Agitadores mecánicos
- Bureta
- Balde
- Recipientes de plástico
- Caja térmica (cooler)
- Etiquetas

#### **3.6.2.2 Equipos**

- Cámara fotográfica
- Laptop marca Hewlett-Packard (hp)
- Multiparámetro
- Espectrofotómetro de absorción atómica

#### **3.6.2.3 Reactivos**

- Agua desionizada
- Agua destilada
- Hielo
- Ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ )

### **3.6.3. Fuentes**

La fuente de recolección de datos estuvo basada en los experimentos que se realizó en la tesis y en información que se ha recopilado de artículos científicos,

tesis, normatividad vigente y textos se la especialidad como información primaria para poder discutir y fundamentar los resultados.

### 3.7. Procesamiento estadístico de la información

#### 3.7.1. Estadísticos

**Tabla 4**

*Tratamientos del experimento.*

<b>T1</b>	Jacinto de agua y Lenteja de agua (0 días)
<b>T2</b>	Jacinto de agua y Lenteja de agua (10 días)
<b>T3</b>	Jacinto de agua y Lenteja de agua (20 días)
<b>T4</b>	Jacinto de agua y Lenteja de agua (30 días)

**Fuente:** Elaboración propia.

Se utilizó el diseño completamente al azar (DCA) con cuatro tratamientos y dos repeticiones, cuyo análisis de variancia fue el siguiente:

**Tabla 5**

*Análisis de variancia (ANVA).*

<b>Fuentes de variación</b>	<b>GL</b>
Tratamientos	3
Error experimental	4
Total	7

**Fuente:** Elaboración propia.

El modelo estadístico será el siguiente:

$$X_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

$\mu$  : Es el efecto medio

$\tau_i$  : Es el efecto de i-ésimo tratamiento

$\varepsilon_{ij}$  : Error experimental

### **3.7.2. Representación**

La información (datos) una vez tabulados y procesados estadísticamente se representaron en tablas y figuras para su interpretación y discusión correspondiente, de tal manera que se pudo comparar con resultados de otros trabajos de investigación similares y realizar las constataciones de la hipótesis global y estadísticas correspondientes.

### **3.7.3. Técnica de comprobación de la hipótesis**

Para determinar el efecto de los diferentes tratamientos sobre la remoción de los metales pesados en las aguas del río Moquegua, con los resultados obtenidos de los análisis químicos, se realizó el análisis de varianza (ANVA) correspondiente, utilizando el diseño completamente aleatorio (DCA), con el soporte del software SPSS versión 26, para cada variable dependiente estudiada. Asimismo, según los resultados y la significancia de la prueba de F (RA Fisher) ya sea al nivel de 0,05 ó 0,01 se realizó la prueba de significación de Tukey, para determinar las diferencias estadísticas entre los promedios correspondientes.

**CAPÍTULO IV**  
**ORGANIZACIÓN, PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE**  
**RESULTADOS**

## 4.1. Resultados

En el presente ítems se presentan e interpretan los resultados obtenidos de la variable dependiente (calidad de agua), a través de los indicadores: Aluminio, boro, hierro y manganeso, en aguas del río Moquegua utilizando dos especies vegetales (*Eichhornia crassipes* y *Lemna minor*), bajo cuatro tratamientos (tiempos: 0, 10, 20 y 30 días).

Las claves que se utilizarán para la identificación de los tratamientos serán las siguientes:

- T1= Tratamiento 1 = (testigo o ningún tratamiento de fitorremediación)
- T2= Tratamiento 2 = (fitorremediación de aguas del río Moquegua por un tiempo de 10 días, utilizando *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor*).
- T3= Tratamiento 3 = (fitorremediación de aguas del río Moquegua por un tiempo de 20 días, utilizando *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor*).
- T4= Tratamiento 4 = (fitorremediación de aguas del río Moquegua por un tiempo de 30 días, utilizando *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor*).

### 4.1.1. Fitorremediación de aluminio en aguas del río Moquegua utilizando *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor*

En la tabla 6 se presenta los resultados del análisis de varianza (ANVA), encontrándose diferencias altamente significativas entre los tratamientos en estudio, es decir que el efecto de los tiempos en días (tratamientos) para la fitorremediación del aluminio en aguas del río Moquegua utilizando *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor* fue estadísticamente diferente.

**Tabla 6**

*Análisis de variancia de la fitorremediación de aluminio utilizando Eichhornia crassipes y Lemna minor.*

<b>F. de variación</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>FC</b>	<b>Sig.</b>
Tratamientos	3	10,535	4013349,857	**
Error exp.	4	3,500x10 <sup>-6</sup>		
Total	7	10,535		

\*\* Significativo al nivel de 0,01

**Fuente:** Elaboración propia.

Al realizar la prueba de comparación de medias de Tukey, al nivel 0,05; para determinar el efecto de los tiempos en la fitorremediación del aluminio en aguas del río Moquegua utilizando *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor*, como se muestra en la tabla 7; el primer lugar lo ocupa el tratamiento 4 (30 días) [efluente final] con un valor de 0,290 mg/L, en segundo lugar lo ocupa el tratamiento 3 (20 días) con un valor de 0,410 mg/L y en último lugar lo ocupa el tratamiento 2 (10 días) con 0,455 mg/L. El tratamiento 1 (T1) corresponde al valor del afluente que fue de 3,031 mg/L

**Tabla 7**

*Prueba de comparación de medias de Tukey de la fitorremediación de aluminio utilizando Eichhornia crassipes y Lemna minor.*

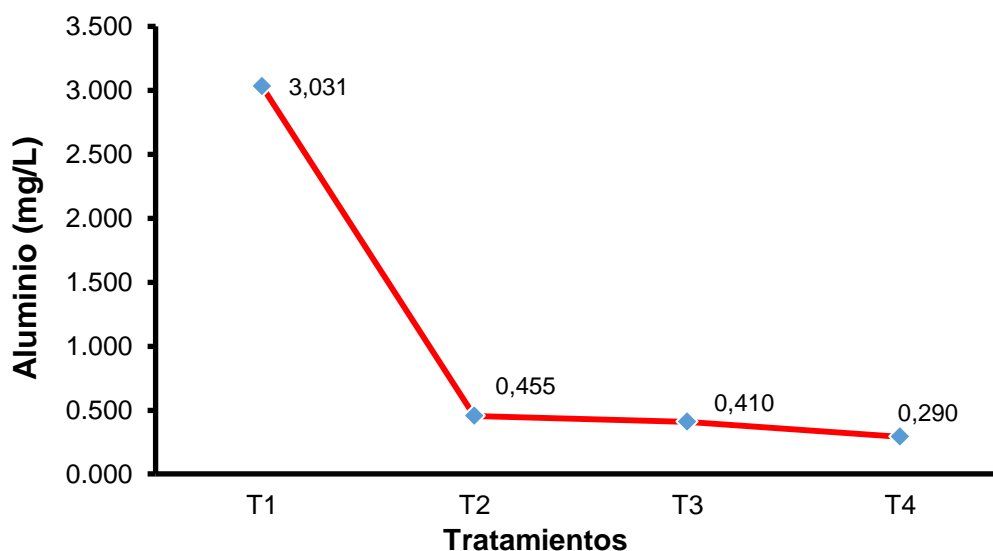
<b>Nº de orden</b>	<b>Tratamientos</b>	<b>Promedio (mg/L)</b>	<b>Significación (0,05)</b>	<b>Mérito</b>
1	T4	0,290	a	1°
2	T3	0,410	b	2°
3	T2	0,455	c	3°
4	T1	3,031	d	4°

**Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 3, también se presenta el efecto de la fitorremediación del aluminio en aguas del río Moquegua utilizando *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor*, obtenido por los cuatro tratamientos sometidos a estudio

**Figura 3**

Fitorremediación de aluminio en aguas del río Moquegua utilizando *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor*.



**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.1.2. Fitorremediación de boro en aguas del río Moquegua utilizando *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor*

A continuación en la tabla 8, se presenta los resultados del análisis de varianza, encontrándose diferencias altamente significativas entre los tratamientos en estudio, es decir que el efecto de los tiempos en días (tratamientos) para la fitorremediación del metal boro en aguas del río Moquegua utilizando *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor* fue estadísticamente diferente.



**Tabla 8**

*Análisis de variancia de la fitorremediación de boro utilizando Eichhornia crassipes y Lemna minor.*

<b>F. de variación</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>FC</b>	<b>Sig.</b>
Tratamientos	3	2,015	255817,063	**
Error exp.	4	1,050x10 <sup>-5</sup>		
Total	7	2,015		

\*\* Significativo al nivel de 0,01

**Fuente:** Elaboración propia.

Con la prueba de significación de Tukey, al nivel 0,05; se determinó el efecto de los tiempos en la fitorremediación del boro en aguas del río Moquegua utilizando *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor*, tal como se presenta en la tabla 9; el primer lugar lo ocupa el tratamiento 4 (30 días) [efluente final] con un valor de 0,152 mg/L, en segundo lugar los ocupa el tratamiento 3 (20 días) con un valor de 0,187 mg/L y en último lugar lo ocupa el tratamiento 2 (10 días) con 0,201 mg/L. El tratamiento 1 (T1) corresponde al valor del afluente que fue de 1,338 mg/L.

**Tabla 9**

*Prueba de significación de Tukey de la fitorremediación de boro utilizando Eichhornia crassipes y Lemna minor.*

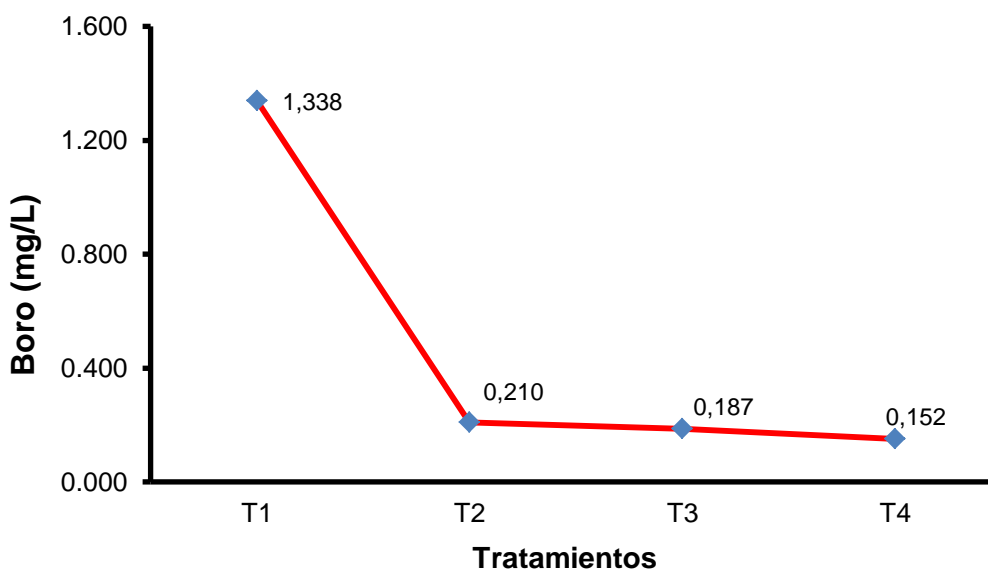
<b>Nº de orden</b>	<b>Tratamientos</b>	<b>Promedio (mg/L)</b>	<b>Significación (0,05)</b>	<b>Mérito</b>
1	T4	0,152	a	1°
2	T3	0,187	b	2°
3	T2	0,201	c	3°
4	T1	1,338	d	4°

**Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 4, se presenta el efecto de la fitorremediación del boro en aguas del río Moquegua utilizando *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor*, obtenido por los cuatro tratamientos sometidos a estudio.

**Figura 4**

Fitorremediación de boro en aguas del río Moquegua utilizando *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor*.



**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.1.3. Fitorremediación de hierro en aguas del río Moquegua utilizando *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor*

En la tabla 10, se presenta los resultados del ANVA, encontrándose diferencias altamente significativas entre los tratamientos en estudio, es decir que el efecto de los tiempos en días (tratamientos) para la fitorremediación del hierro en aguas del río Moquegua utilizando *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor* fue estadísticamente diferente o por lo menos uno es diferente al resto.

**Tabla 10**

*Análisis de variancia de la fitorremediación de hierro utilizando Eichhornia crassipes y Lemna minor.*

<b>F. de variación</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>FC</b>	<b>Sig.</b>
Tratamientos	3	1,365	121312,400	**
Error exp.	4	1,500x10 <sup>-5</sup>		
Total	7	1,365		

\*\* Significativo al nivel de 0,01

**Fuente:** Elaboración propia.

Al realizar la prueba de significación de Tukey, al nivel 0,05; para determinar el efecto de los tiempos en la fitorremediación del hierro en aguas del río Moquegua utilizando *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor*, como se muestra en la tabla 11; el primer lugar lo ocupa el tratamiento 4 (30 días) [efluente final] con un valor de 0,117 mg/L, en segundo lugar lo ocupa el tratamiento 3 (20 días) con un valor de 0,151 mg/L y en último lugar lo ocupa el tratamiento 2 (10 días) con 0,165 mg/L. El tratamiento 1 (T1) corresponde al valor del afluente que fue de 1,097 mg/L.

**Tabla 11**

*Prueba de significación de Tukey de la fitorremediación de hierro utilizando Eichhornia crassipes y Lemna minor.*

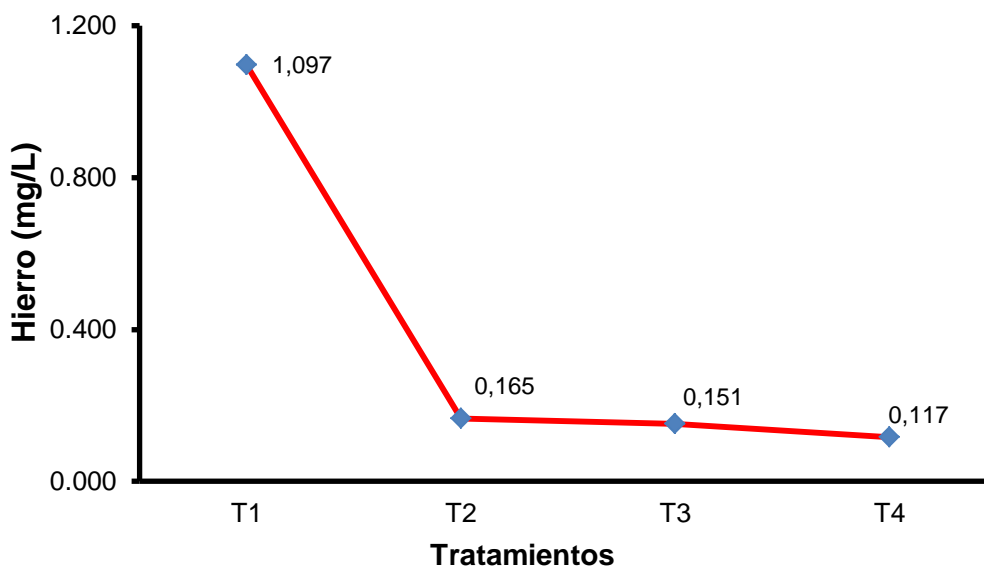
<b>Nº de orden</b>	<b>Tratamientos</b>	<b>Promedio (mg/L)</b>	<b>Significación (0,05)</b>	<b>Mérito</b>
1	T1	0,117	a	1°
2	T2	0,151	b	2°
3	T3	0,165	c	3°
4	T4	1,097	d	4°

**Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 5, se presenta el efecto de la fitorremediación del hierro en aguas del río Moquegua utilizando *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor*, obtenido por los cuatro tratamientos sometidos a estudio.

**Figura 5**

Fitorremediación de hierro en aguas del río Moquegua utilizando *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor*.



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.4. Fitorremediación de manganeso en aguas del río Moquegua utilizando *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor*

Según el ANVA se encontró diferencias altamente significativas entre los tratamientos en estudio (tabla 12), es decir que el efecto de los tiempos en días (tratamientos) para la fitorremediación del manganeso en aguas del río Moquegua utilizando *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor* fue estadísticamente diferente.

**Tabla 12**

*Análisis de variancia de la fitorremediación de manganeso utilizando Eichhornia crassipes y Lemna minor.*

<b>F. de variación</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>FC</b>	<b>Sig.</b>
Tratamientos	3	0,434	128707,963	**
Error exp.	4	4,500x10 <sup>-6</sup>		
Total	7	0,434		

\*\* Significativo al nivel de 0,01

**Fuente:** Elaboración propia.

Con la prueba de comparación de medias de Tukey, al nivel 0,05; se determinó el efecto de los tiempos en la fitorremediación del manganeso en aguas del río Moquegua utilizando *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor*, tal como se presenta en tabla 13; el primer lugar lo ocupa el tratamiento 4 (30 días) [efluente final] con un valor de 0,032 mg/L, en segundo lugar lo ocupa el tratamiento 3 (20 días) con un valor de 0,086 mg/L y en último lugar lo ocupa el tratamiento 2 (10 días) con 0,091 mg/L. El tratamiento 1 (T1) corresponde al valor del afluente que fue de 0,605 mg/L.

**Tabla 13**

*Prueba de significación de Tukey de la fitorremediación de manganeso utilizando Eichhornia crassipes y Lemna minor.*

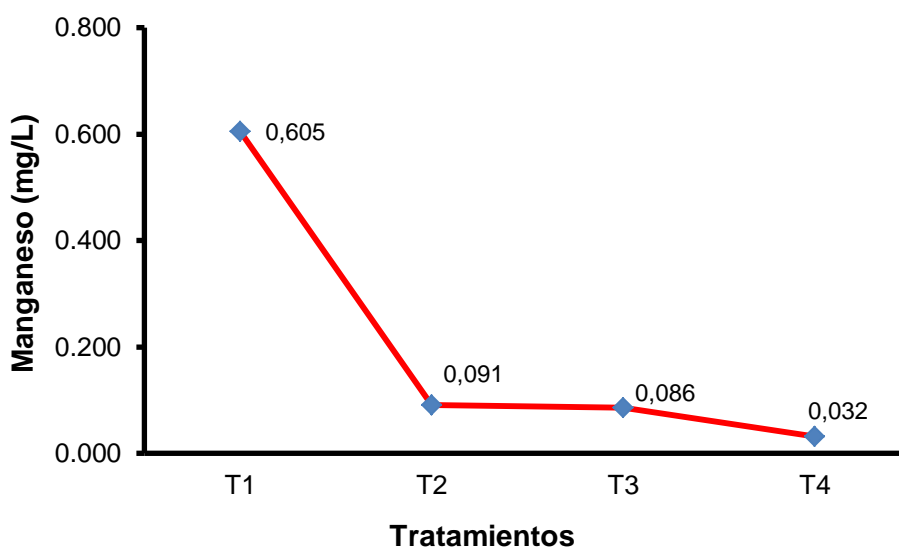
<b>Nº de orden</b>	<b>Tratamientos</b>	<b>Promedio (mg/L)</b>	<b>Significación (0,05)</b>	<b>Mérito</b>
1	T1	0,032	a	1°
2	T2	0,086	b	2°
3	T3	0,091	c	3°
4	T4	0,605	d	4°

**Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 6, se observa el efecto de la fitorremediación del manganeso en aguas del río Moquegua utilizando *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor*, obtenido por los cuatro tratamientos sometidos a estudio.

**Figura 6**

Fitorremediación de manganeso en aguas del río Moquegua utilizando *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor*.



**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.2. Discusión de resultados

Según el anexo 5, el contenido de aluminio en el agua del río Moquegua tuvo un valor de 3,031 mg/L (afluente), valor que estuvo por debajo del ECA establecido por el DS 004-2017-MINAN, para la categoría 3: Riego de vegetales (D1) y bebida de animales (D2), cuyo ECA establecido es de 5 mg/L. Sin embargo al someter al primer tratamiento (10 días) con las macrofitas *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor*, se redujo muy significativamente a 0,455 mg/L, posteriormente al segundo tratamiento (20 días), tuvo una reducción ligera a 0,455 mg/L, finalmente al someter al último tratamiento (30 días) se redujo ligeramente a 0,410 mg/L (efluente final). Con los resultados obtenidos para comparar las medias de los tratamiento se utilizó la técnica estadística del ANVA (tabla 6) resultando altamente significativa la diferencia entre los

tratamientos; posteriormente se realizó la prueba de comparación de medias de Tukey ( $\alpha=0,05$ ) con el objetivo de determinar la diferencia entre los promedios y el mérito correspondiente (tabla 7), encontrándose que a los 10 días se logra obtener una remoción de aluminio en el agua del 84,99 %, y a los 30 días (afluente final) se logró una remoción del 90,41 %.

Para el caso del contenido de boro en el agua del río Moquegua tuvo un valor de 1,338 mg/L (afluente), valor que estuvo por encima del ECA establecido por el DS 004-2017-MINAN (anexo 4), para la categoría 3: Riego de vegetales (D1), cuyo ECA establecido es de 1 mg/L para riego de vegetales (D1), pero por debajo de los ECA establecido para bebida de animales que es de 5 mg/L (D2). Sin embargo al someter al primer tratamiento (10 días) con las macrofitas *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor*, se redujo muy significativamente a 0,201 mg/L, posteriormente al segundo tratamiento (20 días), tuvo una reducción ligera a 0,187 mg/L, finalmente al someter al último tratamiento (30 días) se redujo ligeramente a 0,152 mg/L (efluente final). Asimismo, con los resultados obtenidos para comparar las medias de los tratamiento se utilizó la técnica estadística del ANVA (tabla 8) resultando altamente significativa la diferencia entre los tratamientos; posteriormente se realizó la prueba de comparación de medias de Tukey ( $\alpha=0,05$ ) con el objetivo de determinar la diferencia entre los promedios y el mérito correspondiente (tabla 9), encontrándose que a los 10 días se logra obtener una remoción de boro en el agua del 84,98 %, y a los 30 días (afluente final) se logró una remoción del 88,64 %.

En lo referente a la fitorremediación de hierro en el agua del río Moquegua, se tuvo un valor inicial (anexo 5) de 1,097 mg/L (afluente), valor que estuvo por encima del ECA establecido por el DS 002-2008-MINAN (anexo 4), para la categoría 3: Riego de vegetales tallo bajo y tallo alto; y, bebida para animales, cuyo ECA establecido era de 1 mg/L. Sin embargo, según el DS 004-2017-MINAN (anexo 4) los valores de los ECAs han sido modificados para riego de vegetales (D1), cuyo valor vigente del ECA es de 5 mg/L y aparece con asterisco (\*\*) los valores de los ECAS para bebida de animales. Al someter al primer tratamiento (10 días) con las macrófitas *Eichhornia crassipes* y *Lemna*

*minor*, se redujo muy significativamente a 0,165 mg/L, posteriormente al segundo tratamiento (20 días), tuvo una reducción ligera a 0,151 mg/L, finalmente al someter al último tratamiento (30 días) se redujo ligeramente a 0,117 mg/L (efluente final). Asimismo, con los resultados obtenidos para comparar las medias de los tratamientos se utilizó la técnica estadística del ANVA (tabla 10) resultando altamente significativa la diferencia entre los tratamientos; posteriormente se realizó la prueba de comparación de medias de Tukey ( $\alpha=0,05$ ) con el objetivo de determinar la diferencia entre los promedios y el mérito correspondiente (tabla 11), encontrándose que a los 10 días se logra obtener una remoción de hierro en el agua del 86,24 %, y a los 30 días (afluente final) se logró una remoción del 89,33 %.

Para el caso del contenido de manganeso en el agua del río Moquegua tuvo un valor de 0,605 mg/L (afluente), valor que estuvo por encima del ECA establecido por el DS 004-2017-MINAN (anexo 4), para la categoría 3: Riego de vegetales (D1) y bebida de animales (D2), cuyo ECA establecido es de 0,2 mg/L. Sin embargo al someter al primer tratamiento (10 días) con las macrofitas *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor*, se redujo muy significativamente a 0,091 mg/L, posteriormente al segundo tratamiento (20 días), tuvo una reducción ligera a 0,086 mg/L, finalmente al someter al último tratamiento (30 días) se redujo ligeramente a 0,032 mg/L (efluente final). Asimismo, con los resultados obtenidos para comparar las medias de los tratamientos se utilizó la técnica estadística del ANVA (tabla 12) resultando altamente significativa la diferencia entre los tratamientos; posteriormente se realizó la prueba de comparación de medias de Tukey ( $\alpha=0,05$ ) con el objetivo de determinar la diferencia entre los promedios y el mérito correspondiente (tabla 13), encontrándose que a los 10 días se logra obtener una remoción de manganeso en el agua del 85,79 %, y a los 30 días (afluente final) se logró una remoción del 94,71 %.

Los resultados obtenidos en la fitorremediación del aluminio, boro, hierro y manganeso, se asemejan con lo reportado por con Olguín y Hernández (1989), Roldan y Álvarez (2002), Zayed (1988), Carrión et al. (2012), Atehortua y Gartner (2013), García (2012) y Bedoya (2012), donde se ha trabajado con



*Eichhornia crassipes* y *Lemna minor* en forma individual e integrada y ha demostrado que es posible remover diferentes contaminantes de aguas residuales domésticas y en aguas contaminadas con metales, en laboratorio y en cuerpos naturales, llegando a una eficiencia en la remoción mayor al 90 %, siendo una de las ventajas de la especies vegetales su rápido crecimiento haciéndolas como plantas apropiadas para actividades de fitorremediación; destacando a las lemnáceas (*Lemna minor*) que es muy tolerante a un amplio rango de temperatura, además se encuentra en todos los climas a excepción de los lugares muy fríos. El crecimiento de la lenteja de agua muestra una clara relación con la temperatura, encontrándose valores mínimos, óptimos y máximos. Asimismo el Gobierno Regional Moquegua (2012) indica que existe sistemas de humedales artificiales que viene funcionando con éxito en el país es el implementado en la unidad minera de Orcopampa (Arequipa) en el que se ha conseguido aprovechar el efecto sinérgico de plantas fitorremediadoras propias del lugar de lámina con el uso de bacterias sulfato reductoras (BSR) nativas existentes en dicho medio y su posterior obtención de aguas clarificadas y con niveles mínimos de metales pesados.

Además se indica que las plantas vasculares (*Eichhornia crassipes* y *Lemna minor*) pueden usarse para biorremediación de aguas contaminadas, con algunas ventajas sobre las algas: Tienen ciclos de vida más prolongados, tienen altos grados de tolerancia a la mayoría de elementos, incluyendo aquellos metales pesados responsables de la contaminación y la toxicidad de los ecosistemas y fuentes de agua, la biomasa es mucho mayor que las algas, de tal forma que se puede usar muestras muy grandes para los análisis químicos; debiendo contar con los siguientes requerimientos esenciales: La especie debe ser endémica del área, debe ser fácilmente cultivable o abundante en el campo, debe concentrar los elementos objetivo por encima del umbral del límite de detección del método analítico, debe haber significancia estadística entre la abundancia del elemento objetivo en la planta y su nivel de concentración en el agua que la rodea.

También, Gobierno Regional Moquegua (2012) menciona que el Jacinto de agua tiene una serie de problemas que tiende a dificultar su uso comercial. El primero de estos es que en muchas ciudades es considerado como una hierba nociva y puede dejar sin oxígeno toda el área de la laguna. Por ejemplo en Sudán se cubrió un área extensa del río Nilo. Otra desventaja, es que esta planta crece solo en climas tropicales o zonas templadas donde no predomina la nevada en invierno. Se sugiere, que ambas especies pueden ser usadas para biorremediación de aguas contaminadas y pueden emplearse, pasando el efluente por un lecho formado por estas plantas contenidas en la laguna.

Debido a su movilidad en los ecosistemas acuáticos naturales y a su toxicidad para las formas superiores de vida, los iones de metales pesados presentes en los abastecimientos de aguas superficiales y subterráneos, se les ha dado prioridad como los contaminantes inorgánicos más importantes en el ambiente. Aun cuando se encuentren presentes en cantidades bajas e indetectables, la recalcitrancia y consiguiente persistencia de los metales pesados en cuerpos de agua, implica que a través de procesos naturales como la biomagnificación, su concentración puede llegar a ser tan elevada que empiece a ser tóxica.

Las fuentes de los metales no son renovables y las reservas naturales están siendo consumidas, por lo tanto; es imperativo que aquellos metales considerados peligrosos desde el punto de vista ambiental, o aquellos de importancia tecnológica, de significado estratégico o de valor económico, deban ser removidos/recuperados en su lugar de origen, utilizando sistemas de tratamiento apropiados

El Jacinto de agua es capaz de metabolizar incluso tóxicos como los fenoles (se han reportado capacidades de absorción de hasta 30 kg de fenol/día por cada ha cubierta de Jacinto). Se han reportado producciones de Jacinto de hasta 2 190 t/ha/año de biomasa fresca (equivalentes a unas 130 t/ha/año de biomasa seca). Dicha biomasa es apta para forraje, para combustible, o bien para la fabricación de papel. La desventaja para su utilización es que el Jacinto de agua muere cuando las temperaturas descienden por debajo de los 15 °C.

Tratándose de una planta muy invasora, deben tomarse precauciones para evitar que de algún modo pueda “escapar” a ríos o lagos donde crearía desastres ecológicos.

La lenteja de agua es cosmopolita. Su capacidad de acumular biomasa tampoco es desdeñable: unas 50 t de materia seca/ha/año. Como forraje es superior al Jacinto de agua. Tiene hasta un 40 % de carbohidratos. Resiste mejor al frío y evapora menos por la baja relación superficie/ volumen de sus hojas (Landolt, 1987, citado por Gobierno Regional Moquegua, 2012).

El Gobierno Regional Moquegua (2012), recomienda la implementación de humedales artificiales, por lo que desempeñan un papel importante en la descentralización de sistemas de tratamiento de aguas, debido a sus características como sistemas "naturales" de fácil aplicación, con un óptimo costo, un uso eficaz y bajas exigencias operativas. Un aspecto especial de gran importancia es el uso de la humedad artificial para el tratamiento de aguas ácidas. Además indica que para el caso de macrófitas flotantes como la *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor* se puede desarrollar humedales de sistema de plantas sumergidas. Estos sistemas acuáticos de plantas se puede dividir en dos categorías: los sistemas con plantas acuáticas flotantes como el junco, lenteja de agua, y los sistemas con plantas acuáticas sumergidas; generalmente se pueden fusionar los dos sistemas. La mayoría de los sistemas de plantas acuáticas flotantes han usado a la totora, junco, caña, lenteja de agua, etc.

Según el Gobierno Regional de Moquegua (2012), los sistemas acuáticos de tratamiento se han utilizado con éxito desde 1970, y consisten en uno o más estanques de poca profundidad en los que una o más especies de agua plantas tolerantes vasculares tales como juncos de agua o de lenteja de agua se cultivan. Las profundidades someras y la presencia de macrófitas acuáticas en lugar de las algas son las principales diferencias entre sistemas acuáticos de tratamiento y lagunas de estabilización. Además la presencia de las plantas

es de gran utilidad práctica e importancia debido a que el efluente de los sistemas acuáticos es de mayor calidad

### **4.3. Contrastación de hipótesis**

#### **Hipótesis general**

La capacidad de dos especies vegetales para la fitorremediación de metales pesados en aguas del río Moquegua es alta.

#### **Hipótesis planteada [nula] (Ho)**

Con la aplicación de los cuatro tratamientos de fitorremediación en aguas del río Moquegua, utilizando dos especies vegetales (*Eichhornia crassipes* y *Lemna minor*) no se tiene efecto significativo, de ningún tratamiento, en la remoción de metales pesados como el aluminio, boro, hierro y manganeso.

#### **Hipótesis alterna (Ha)**

Con la aplicación de los cuatro tratamientos de fitorremediación en aguas del río Moquegua, utilizando dos especies vegetales (*Eichhornia crassipes* y *Lemna minor*), al menos un tratamiento tiene efecto significativo en la remoción de metales pesados como el aluminio, boro, hierro y manganeso.

En la tabla 14, se presenta los resultados de la comprobación de la hipótesis a través de la técnica del ANVA, bajo el modelo estadístico del diseño completamente aleatorio (DCA), en la que según la prueba de F (Fisher) calculado (FC) supera a la prueba de F tabular (FT) a un nivel de significancia del 0,01 (99 %), lo que nos resulta altamente significativo, es decir existen diferencias estadísticas altamente significativas (0,01) entre los cuatro tratamientos evaluados (0, 10, 20 y 30 días) para la remoción de los cuatro metales evaluados (aluminio, boro, hierro y manganeso) en aguas del río Moquegua.

Con la significación estadística resultante del ANVA de la tabla 14, nos permite rechazar la hipótesis estadística planteada o nula (Ho) y aceptar la hipótesis alterna (Ha), es decir que con la aplicación de los cuatro tratamientos de

fitorremediación en aguas del río Moquegua, utilizando las especies vegetales *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor*, al menos un tratamiento o todos tuvieron efecto significativo en la remoción de metales pesados analizados (aluminio, boro, hierro y manganeso)

Por consiguiente se ha contrastado la hipótesis general, por lo que la aceptamos; es decir que las dos especies vegetales (*E. crassipes* y *L. minor*) mostraron una alta capacidad para la fitorremediación de metales pesados del agua en el río Moquegua.

**Tabla 14**

*Análisis de variancia de la fitorremediación de aluminio, boro, hierro y manganeso, en cuatro tratamientos, utilizando Eichhornia crassipes y Lemna minor.*

Fuentes de Variación	GL	Al	B	Fe	Mn	FT	Sig.
		FC	FC	FC	FC	(0,05-0,01)	
Tratamientos	3	4013349,857	255817,063	121312,400	128707,963	6,59-16,69	**
E. Exp.	4						
Total	7						

\*\* Significativo al nivel de 0,01

**Fuente:** Elaboración propia.

## CONCLUSIONES

1. Se evaluó la capacidad de remoción de metales pesados como el aluminio, boro, hierro y manganeso, por las especies vegetales *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor*, en la fitorremediación del agua con metales pesados en el río Moquegua.
2. El contenido de metales pesados en el agua del río Moquegua en el afluente, previo a la fitorremediación con las dos especies vegetales, fue de 3,031 mg/L, 1,338 mg/L, 1,097mg/L y 0,605 mg/L para el aluminio, boro, hierro y manganeso, respectivamente.
3. Las dos especies vegetales (*E. crassipes* y *L. minor*) mostraron una alta capacidad para la fitorremediación de metales pesados del agua en el río Moquegua, llegando hasta un 94,71 % en un tiempo de 30 días.
4. El contenido de metales pesados en el agua del río Moquegua en el efluente final, posterior a la fitorremediación con las dos especies vegetales, fue de 0,2895 mg/L, 0,152 mg/L, 0,1165 mg/L y 0,032 mg/L para el aluminio, boro, hierro y manganeso, respectivamente.

## RECOMENDACIONES

Se debe de complementar el trabajo de investigación con la determinación de las concentraciones de metales en la raíz y en la parte área de las plantas.

Se debe repetir el presente trabajo de investigación con la finalidad de ratificar los resultados obtenidos.

## BIBLIOGRAFÍA

- Arteaga, J. A., Cuéllar, W., Ramírez, D.R., Ríos, S. y Giraldo, S. (2010). *“Manejo de plantas acuáticas invasoras en embalses de EPM. Caso: Buchón de agua (Eichhornia crassipes) en el embalse Porce II, Antioquia-Colombia”*. Revista EPM. N° 3. pp 22-35.
- Asesores Técnicos Asociados S.A. (ATA). (2012). *Estudio hidrológico para la determinación del potencial hídrico de las cuencas de los ríos Tambo y Moquegua*. Gobiernos Regionales de Moquegua y Arequipa - Perú. 314 pág.
- Atehortua, E. y Gartner, C. (2013). *Estudios preliminares de la biomasa seca de Eichhornia crassipes como adsorbente de plomo y cromo en aguas*. Grupo de Ciencia de los Materiales, Universidad de Antioquia. Revista Colombiana de Materiales N° 4. Abril de 2013. pp. 81 – 92 Colombia.
- Aroyave, M. (2004). *La lenteja de agua (Lemna minor L.): una planta acuática promisoría*. Revista EIA, ISSN 1794-1237 Número 1 p. 33-38. Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín (Colombia).
- Autoridad Local del Agua [ALA]. (2015). *Descripción general del ámbito del distrito de riego Moquegua*. Moquegua – Perú. 75 pág.
- Autoridad Nacional del Agua [ANA]. (2012a). *Informe e interpretación de resultados del I monitoreo participativo de la calidad de agua superficial de la cuenca del río Moquegua, diciembre 2011*. Moquegua, Perú: Administración Local del Agua (ALA) Moquegua.
- Autoridad Nacional del Agua [ANA]. (2012b). *Informe e interpretación de resultados del II monitoreo participativo de la calidad de agua superficial de la cuenca del río Moquegua, agosto 2012*. Moquegua, Perú: Administración Local del Agua (ALA) Moquegua.
- Autoridad Nacional del Agua [ANA]. (2013). *Informe e interpretación de resultados del III monitoreo participativo de la calidad de agua superficial de la cuenca del río Moquegua-Ilo, junio 2013*. Moquegua, Perú: Administración Local del Agua (ALA) Moquegua.
- Autoridad Nacional del Agua [ANA]. (2014). *Informe e interpretación de resultados del IV monitoreo participativo de la calidad de agua superficial*



- de la cuenca del río Moquegua-Ilo, abril 2014.* Moquegua, Perú: Administración Local del Agua (ALA) Moquegua.
- Autoridad Nacional del Agua [ANA]. (2015). *Informe e interpretación de resultados del V monitoreo participativo de la calidad de agua superficial de la cuenca del río Moquegua-Ilo, setiembre 2014.* Moquegua, Perú: Administración Local del Agua (ALA) Moquegua.
- Autoridad Nacional del Agua [ANA]. (2016). *Informe e interpretación de resultados del VII monitoreo participativo de la calidad de agua superficial de la cuenca del río Moquegua-Ilo, octubre 2015.* Moquegua, Perú: Administración Local del Agua (ALA) Moquegua.
- Autoridad Nacional del Agua [ANA]. (2017a). *Informe e interpretación de resultados del monitoreo participativo de la calidad de agua superficial de la cuenca del río Moquegua-Ilo, setiembre 2016.* Moquegua, Perú: Administración Local del Agua (ALA) Moquegua
- Autoridad Nacional del Agua [ANA]. (2017b). *Informe e interpretación de resultados del IX monitoreo participativo de la calidad de agua superficial de la cuenca del río Moquegua-Ilo, noviembre 2016.* Moquegua, Perú: Administración Local del Agua (ALA) Moquegua
- Backer, A. (1989). *Terrestrial higher plants which hyper accumulate metallic elements.* A review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery.* 1:81-126.
- Bedoya, D. (2012). *Utilización del Jacinto de agua (Eichhornia crassipes) para el tratamiento biológico de aguas residuales domésticas” en la ciudad de Moquegua.* Perú: Concytec.
- Benavides, J. (2006). *Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos derivados del petróleo.* *Nova.* 4:82-90.
- Brown, R. y Baker, J. (1994). *Phytoremediation potencial of Thalassia caerulea and Bladder campion for zinc and cadmium contaminated soil.* *L. Environ. Qual.* 23: 1151-1154.
- Cañizares, R. (2008). *Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa.* *Revista Latinoamericana de Microbiología,* 42: 131-143.
- Castro De Esparza, M. (2006). *Removal of arsenic in drinking water and soil bioremediation.* Document of International Congress México city. 119 p.

- Carrion, C. et al. (2012). *Aprovechamiento potencial del lirio acuático (Eichhornia crassipes) en Xochimilco México, para fitorremediación de metales*. Facultad de Ciencias, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F.
- Decreto Supremo N° 002-2010-2010-AG. (2010). Reglamento de la Ley N° 29338, Ley de recursos hídricos. Lima, Perú: Ministerio de Agricultura MINAG).
- Decreto Supremo N° 002-2008-MINAN. (2008). Estándares Nacionales de Calidad Ambiental [ECA] para Agua. Lima, Perú: Ministerio del Ambiente (MINAM).
- Decreto Supremo N° 004-2017-MINAN. (2017). Estándares Nacionales de Calidad Ambiental [ECA] para Agua. Lima, Perú: Ministerio del Ambiente (MINAM).
- Decreto Supremo N° 023-2009-MINAN. (2009). Disposiciones para la implementación de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental [ECA]. Lima, Perú: Ministerio del Ambiente (MINAM).
- El Cuaderno. (2006). *Del porqué biotecnología*. Boletín del Consejo Argentino para la información Biotecnológica. Edición N° 36. Argentina.
- García, I. y Dorronsorco, C. (2005). *Contaminación por metales pesados*. Escuela de tecnología de suelos. Universidad de Granada. Departamento de Edafología y Química Agrícola. Recuperado de <http://edafología.urg.es/conta/tema15/introd.htm>.
- Grupo de Fitorremediación. (2007). *La fitorremediación en la descontaminación de áreas agrícolas en San Juan de Lojas* (Informe técnico). U. Agraria La Habana. Facultad de Agronomía. Cuba.
- Gobierno Regional de Moquegua. (2012). *Estudio mejoramiento de la calidad de las aguas del embalse Pasto Grande* distrito Carumas, provincia Mariscal Nieto, región Moquegua. Moquegua, Perú: Proyecto Especial Regional Pasto Grande (PERPG) y Consorcio V-5.
- Hammett, F. (1928). *Studies in the biology of metals: The retardative influence of lead on the root growth*. Protoplasma. 4: 87-191.
- Lagrega, M. (1996). *Gestión de residuos tóxicos: Tratamiento, eliminación y recuperación de suelos*. Madrid España: Editorial McGraw Hill.

- Ley de Recursos Hídricos N° 29338. (2009). Lima, Perú: Congreso de la república del Perú
- Llumelli, M. (2006). *Fitorremediación: otro regalo del reino vegetal*. Recuperado de [www. Estructuplan.com.ar](http://www.Estructuplan.com.ar).
- Misrha, A. (1998). Amelioration of lead and mercury effects of germination and rice seeding growth by antioxidants. *Biol. Plant.* 41: 469-473.
- Olguín, E. and E. Hernández. (1998). Use of aquatic plants for recovery of nutrients and heavy metals from wastewater. Institute of Ecology, Environmental Biotechnology. Vancouver. Recovered from: [www.idrc.ca/industry/canada](http://www.idrc.ca/industry/canada).
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2015). Informe anual.
- Mensah, E. (2008). *Cadmium (Cd) and Lead (Pb) concentrations effects on yields of some vegetables due to uptake from irrigation wáter in Ghana*. Intenational Journal of Agricultural Reseach 3(4): 243-251.
- Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI). (2015). *Informe*. Lima, Perú.
- Nuñez, E. (2007). *La contaminación por plomo en niños del Callao*. Recuperado de [www. Monografías.com.pe](http://www.Monografías.com.pe)
- Olvera, V. (1988). "*Biología y ecología del lirio acuático*." Seminario-taller Control y aprovechamiento del Lirio acuático. Ponencia 2. Instituto Mexicano de tecnología del agua. Secretaria de agricultura y recursos hidráulicos. México D. F.
- Pastor, J. (2006). *Contenido de Zn y Cu en especies de gramíneas, pastizales y harbazales desarrollados sobre suelos contaminados de Madrid*. *Revista Botánica*. 24: 673-679.
- Proyecto Especial Regional Pasto Grande (PERPG). (2015). *Informe*. Moquegua. Perú.
- DIGESA. (2010). *Area de absorción atómica: Protocolos del Laboratorio de Control Ambiental*. Perú.
- Resolución Jefatural N° 202-2010-ANA. (2010). *Clasificación de cuerpos de aguas superficiales y marino-costeros*. Lima, Perú: Autoridad Nacional del Agua (ANA).

- Resolución Jefatural N° 182-2011-ANA. (2011). *Protocolo Nacional de Monitoreo de Calidad de los recursos hídricos superficiales*. Lima, Perú: Autoridad Nacional del Agua (ANA).
- Roldán, G. y Álvarez, L. F. (2002). *Aplicación del Jacinto de agua (Eichhornia crassipes) para el tratamiento de aguas residuales y opciones de reuso de la biomasa producida*. Revista Universidad Católica de Oriente.15: 56-71.
- Tabacchi, P. (2014). *Evaluación de la capacidad de fitoextracción y bioabsorción de cuatro especies vegetales en la fitorremediación de un suelo contaminado con plomo*. Tesis para optar el grado académico de doctor en medio ambiente y desarrollo sostenible. Universidad Inca Garcilazo de la Vega, Lima – Perú.
- Torres, S. M. (2009). *“Estudio del aprovechamiento del lechuguín, Eichhornia crassipes, del embalse de la represa Daniel Palacios como biosorbente de metales pesados en el tratamiento de aguas residuales.”* Tesis para la obtención del título de ingeniería ambiental. Universidad Politécnica Salesiana, México.
- Trejo, R. (2009). *Evaluación de trombillo (Solamun elaeagnifolium) en la fitoextracción de plomo y cadmio en los suelos contaminados*. Revista Chapingo Serie Zonas Aridas. 8: 247-253.
- Salt, D. y Blaylok, N. (1995). *Phytorremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants*. Biotechnology- 13: 464-468.
- Zayed, A. (1998). *Phytoaccumulation of trace elements by wetlands*. Journal of Environmental Quality. 27(3):715-721