

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



Una Institución Adventista

**Evaluación de la capacidad fitorremediadora del Garbancillo
(*Astragalus arequipensis*) en función de tres tipos de
enmiendas orgánicas sobre la remoción de mercurio
del suelo contaminado por la actividad minera del
centro poblado la Rinconada - Región Puno, 2018**

Por:

Jean Ronald Vilcapaza Ccoa

Asesora:

MSc. Rose Adeline Callata Chura

Juliaca, diciembre de 2018

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DEL INFORME DE TESIS

MSc. Rose Adeline Callata Chura, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que el presente informe de investigación titulada: **“Evaluación de la capacidad fitorremediadora del Garbancillo (*Astragalus arequipensis*) en función de tres tipos de enmiendas orgánicas sobre la remoción de mercurio del suelo contaminado por la actividad minera del centro poblado la Rinconada - Región Puno, 2018”** constituye la memoria que presenta el Bachiller Jean Ronald Vilcapaza Ccoa para aspirar al título Profesional de Ingeniero Ambiental, dicha tesis ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente constancia en Juliaca, a los 28 días del mes de diciembre del 2018.

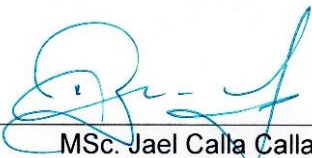
MSc. Rose Adeline Callata Chura

Evaluación de la capacidad fitorremediadora del Garbancillo
(*Astragalus arequipensis*) en función de tres tipos de
enmiendas orgánicas sobre la remoción de mercurio del suelo
contaminado por la actividad minera del centro poblado la
Rinconada-Región Puno, 2018

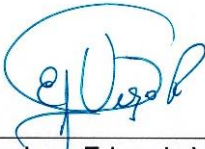
TESIS

Presentada para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental

JURADO CALIFICADOR



MSc. Jael Calla Calla
Presidente



Ing. Juan Eduardo Vigo Rivera
Secretario



Ing. Verónica Haydeé Pari Mamani
Vocal



MSc. Rose Adeline Callata Chura
Asesora

Juliaca, 28 de diciembre de 2018

DEDICATORIA

A Juana Irma, mi madre, y a mi respetable padre: Juan Silverio, por haber confiado en mí, por sus ánimos, confianza y apoyo incondicional para poder realizar mis estudios.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por guiarme por el buen camino, darme fuerzas para seguir adelante y no desmayar en los problemas que se presentaban.

A la Universidad Peruana Unión por darme la oportunidad de estudiar en sus aulas.

A la Escuela Profesional Ingeniería Ambiental facultad de Ingeniería y Arquitectura, a los docentes, quienes no dudaron en brindar sus conocimientos para el desarrollo del proyecto de tesis.

A mi asesora, Msc. Rose Adeline Callata Chura, quien contribuyó para la mejora de este trabajo.

Por último, a todas las personas, quienes han formado parte de mi vida profesional, a quienes me encantaría agradecerles, por su amistad, consejos y apoyo, sin importar donde estén quiero expresarles las gracias.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
CAPÍTULO I EL PROBLEMA	16
1.1. Identificación del problema	16
1.2. Justificación	17
1.3. Presuposición Filosófica.....	18
1.4. Objetivo general	19
1.4.1. Objetivos específicos	19
CAPÍTULO II REVISIÓN DE LA LITERATURA	20
2.1. Antecedentes.....	20
2.1.1. Antecedentes internacionales	20
2.1.2. Antecedentes nacionales.....	22
2.2. Revisión de literatura.....	24
2.2.1. Suelo	24
2.2.2. Potencial de hidrogenación.....	24
2.2.3. Materia orgánica	25
2.2.4. Conductividad eléctrica	26
2.2.5. Textura del suelo	27
2.2.6. Mercurio	28
2.2.7. Propiedades físicas químicas del mercurio.....	29
2.2.8. El ciclo del mercurio	29
2.2.9. Contaminación de suelos por mercurio	30
2.2.10. Efecto del mercurio en la salud	31
2.2.11. Fitorremediación de suelos contaminados.....	33

2.2.12. Fitoextracción	35
2.2.13. Fitoestabilización.....	36
2.2.14. Fitovolatilización.....	37
2.2.15. Fitoestimulación	37
2.2.16. Rizofiltración.....	37
2.2.17. Ventajas y limitaciones de la fitorremediación	37
2.2.18. Mecanismos de fitorremediación.....	38
2.2.19. Garbancillo (<i>Astragalus arequipensis</i>).....	40
2.2.20. Enmiendas orgánicas	42
2.2.21. Estiércol.....	42
CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS	43
3.1. Ámbito de estudio.....	43
3.2. Diseño y tipo de investigación.....	43
3.3. Materias primas	44
3.4. Materiales y equipos.....	45
3.5. Procedimiento del diseño experimental.....	46
3.6. Metodología experimental.....	47
3.7. Procedimiento del experimento	56
3.8. Descripción de los tratamientos.....	56
3.9. Análisis estadístico	58
3.10. Variables de la investigación.....	59
3.11. Parámetros de las variables.....	60
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN	61
4.1. Análisis de supuestos.....	61
4.2. Concentración final de Hg en el suelo.....	63

4.3. Concentración final de pH en el suelo.....	66
4.4. Concentración final de CE en el suelo.....	67
4.5. Concentración final de fósforo en el suelo	68
4.6. Concentración final de potasio en el suelo	69
4.7. Concentración final de nitrógeno total en el suelo	69
4.8. Determinación de la textura del suelo después del tratamiento.	70
4.9. Concentración final de la densidad aparente del suelo.....	71
4.10. Determinación de la capacidad de intercambio catiónico del suelo	71
4.11. Concentración final del porcentaje de materia orgánica total	72
4.12. Concentración para porcentaje de humedad después del tratamiento	73
4.13. Efecto de la incorporación de las diferentes enmiendas en la variación del crecimiento de <i>Astragalus arequipensis</i>	74
4.13.1. Altura de planta.	74
CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	76
5.1. Conclusiones.....	76
5.2. Recomendaciones	77
REFERENCIAS:	78
ANEXOS	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de suelos de acuerdo a su pH.....	25
Tabla 2. Contenido de materia orgánica en suelos.	26
Tabla 3. Clasificación de suelos por su conductividad eléctrica.	26
Tabla 4. Mecanismos de fitorremediación.	39
Tabla 5. Identificación botánica del garbancillo (<i>Astragalus arequipensis</i>).	40
Tabla 6. Materias primas para el proceso experimental.	44
Tabla 7. Materiales a usar para el proceso experimental.....	45
Tabla 8. Estándares de calidad ambiental para suelo.	47
Tabla 9. Delimitación geográfica.	48
Tabla 10. Puntos de muestreo – coordenadas.....	49
Tabla 11. Determinación de mercurio.	50
Tabla 12. Determinación de textura del suelo.	51
Tabla 13. Determinación densidad aparente.....	52
Tabla 14. Determinación de pH.....	53
Tabla 15. Determinación de conductividad eléctrica.	54
Tabla 16. Determinación de humedad del suelo.....	55
Tabla 17. Distribución de los tratamientos.....	57
Tabla 18. Repeticiones de cada tratamiento.	58
Tabla 19. Parámetros de las variables.	60
Tabla 20. Prueba de normalidad.	62
Tabla 21. Prueba de homogeneidad de varianza.	62
Tabla 22. Análisis de varianza paramétrica de concentración final de mercurio.	63
Tabla 23. Prueba de Duncan ($p \leq 0.05$) de concentración de mercurio final.	64
Tabla 24. Caracterización para el efecto sobre la reacción del suelo pH.	67
Tabla 25. Caracterización de la conductividad eléctrica del suelo.....	68
Tabla 26. Caracterización de la concentración final de fósforo.	69
Tabla 27. Caracterización para el potasio disponible después del tratamiento.	69
Tabla 28. Caracterización para porcentaje de nitrógeno total después de tratamiento.....	70
Tabla 29. Caracterización para la densidad aparente del suelo.	71

Tabla 30. Caracterización de la capacidad de intercambio catiónico del suelo después del tratamiento.....	72
Tabla 31. Caracterización de materia orgánica después del tratamiento.....	73
Tabla 32. Caracterización para porcentaje de humedad total.....	73
Tabla 33. Altura de la especie <i>Astragalus arequipensis</i>	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Triangulo textural de suelo.....	28
Figura 2. Vías de exposición al mercurio, del organismo humano.	32
Figura 3. Tipos de fitorremediación.	35
Figura 4. Espécimen vegetal de <i>Astragalus arequipensis</i>	41
Figura 5. Procedimiento del diseño experimental.	46
Figura 6. Imagen satelital de la zona y puntos de muestreo.	49
Figura 7. Análisis del Hg después del tratamiento.	66
Figura 8. Determinación de la textura del suelo final.....	70
Figura 9. Altura de planta en los tratamientos.....	75

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A. Análisis de mercurio inicial del suelo contaminado provenientes de la actividad minera.	87
ANEXO B. Análisis de caracterización del suelo contaminado proveniente de la actividad minera.	88
ANEXO C. Análisis de porcentaje de humedad del suelo contaminado proveniente de la actividad minera.	89
ANEXO D. Análisis de densidad aparente del suelo contaminado proveniente de la actividad minera.	90
ANEXO E. Análisis de mercurio después del experimento en todos los tratamientos.	91
ANEXO F. Análisis de caracterización después del experimento en todos los tratamientos. ..	92
ANEXO G. Panel fotográfico.....	93

SÍMBOLOS USADOS

MINAM	: Ministerio del ambiente.
Hg	: Mercurio.
PUNMA	: Programa de las naciones unidas para el medio ambiente.
USEPA	: United states environmental protection agency. (Agencia de protección ambiental de los Estados Unidos)
EPA	: Environmental protection agency. (Agencia de protección Ambiental)
ECA	: Estándares de Calidad Ambiental.
DCA	: Diseño Completamente Aleatorio
ATSDR	: Agencia de sustancias tóxicas y registro de enfermedades
DS	: Decreto supremo.
ppm	: Partes por millón
pH	: Potencial de hidrogeno
T1, T2, T3, T4	: Tratamientos
R1, R2, R3, R4	: Repeticiones
mg/L	: Miligramos por litro
MO	: Materia orgánica
da	: Densidad aparente
CIC	: Capacidad de intercambio catiónico

RESUMEN

La presente investigación tiene el propósito de evaluar la capacidad fitorremediadora del garbancillo (*Astragalus arequipensis*), en función de tres tipos de enmiendas orgánicas sobre la remoción de mercurio del suelo contaminado por la actividad minera. Fueron recolectados 64 kg de muestra de suelos proveniente del centro poblado La Rinconada, región Puno. La muestra fue homogenizada; se realizaron los análisis físicos químicos brindando datos iniciales del suelo. El material fue dividido en 20 unidades experimentales, distribuidas en grupos de 5 unidades; cada grupo de unidad fue sometido a diferentes tratamientos de acuerdo con un diseño completamente aleatorio: T1= Suelo contaminado más garbancillo (grupo control), T2= Suelo contaminado más garbancillo más lombricompost, T3= Suelo contaminado más garbancillo más estiércol de bovino y T4= Suelo contaminado más garbancillo más estiércol de oveja; el experimento tuvo una duración de 62 días. Las muestras tratadas fueron analizadas físico-químicamente. Los resultados mostraron una remoción de 97.55ppm, 85.45 ppm, en T2 y T3 respectivamente, y 87.47 ppm en T1 y T4. Se observó una diferencia significativa ($p < 0.05$) en todos los tratamientos. Se concluye que el mejor tratamiento para suelos con alto contenido de mercurio es el tratamiento 2 (garbancillo más lombricompost).

Palabras Clave: *Fitorremediación, garbancillo, remoción de mercurio.*

ABSTRACT

The present investigation has the purpose of evaluating the capacity of repair of the machine of the garbancillo (*Astragalo arequipensis*), in the function of the types of organic amendments on the removal of mercury from the soil contaminated by the mining activity. 64 kg of soil samples were collected from the town of La Rinconada, Puno region. The sample was homogenized; The physical analyzes were performed. The material was divided into 20 experimental units, distributed in groups of 5 units; T1 = Contaminated soil plus garbancillo (control group), T2 = Contaminated soil plus garbancillo plus vermicompost, T3 = Contaminated soil plus garbancillo plus cow dung and T4 = Contaminated soil plus garbancillo plus sheep manure; The experiment lasted 62 days. The treated samples were analyzed physically-chemically. The results obtained a removal of 97.55 ppm, 85.45 ppm, in T2 and T3 respectively, and 87.47 ppm in T1 and T4. A significant difference was observed ($p < 0.05$) in all treatments. It is concluded that the best treatment for soils with high mercury content is treatment 2 (garbancillo plus vermicompost).

Keywords: *Phytoremediation, garbancillo, mercury removal.*

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1. Identificación del problema

En la actualidad la contaminación de suelos es uno de los mayores problemas en el Perú, y uno de los causantes es el mercurio y su uso indiscriminado e inadecuado para su extracción del oro.

El centro poblado La Rinconada, ubicado a más de 5000 msnm en la provincia de San Antonio de Putina (Puno) es el mayor problema de contaminación ambiental generado por la minería informal por el uso exagerado e inadecuado de mercurio para la extracción de oro, que altera a la flora y fauna, así como cultivos y ganadería, con los consiguientes riesgos sobre la salud de las personas además se estima que se pierden cada año alrededor de 15 toneladas de mercurio líquido en la zona de Puno, al año 2009 el valor de pérdida estaría en 120 toneladas, acrecentando la contaminación ambiental y los riesgos de salud de las personas (Mosquera, Trillo & Lujan, 1999).

El oro como metal tiene esa característica de adherirse con el mercurio, para ello la obtención de dicho metal consiste de cuatro etapas fundamentales: amalgamación o combinación, separación de la parte mineral de la aleación, quema de la amalgama mercurio-oro y purificación del oro. Con respecto a la primera consiste en mezclar mecánicamente o manualmente la roca triturada con mercurio, luego este proceso de amalgamación es sometido a altas temperaturas con lo que se puede separar el oro sólido del mercurio; por esta razón, es liberado al ambiente

como estado gaseoso o vapor. Como resultado de los procesos anteriores, se genera el rebosamiento o derrame directo a grandes cantidades de mercurio a suelos (Hinton & Veiga, 2001).

Del mismo modo, la contaminación por mercurio gaseoso se produce por la gran emisión de gases al medio ambiente (estado altamente tóxico), originados a partir de la quema a cielo abierto de la amalgama de Hg + Au, conocido como refogado del oro. Por este proceso el mercurio se evapora rápidamente y es liberado al medio ambiente, precipitándose aproximadamente el 50%. Por lo tanto, por cada gramo de oro se queman dos de mercurio, por este proceso se emiten anualmente al medio ambiente 20 tn de Hg, se estima una producción anual de 10 tn de oro para las áreas de La Rinconada- Ananea Puno (Mosquera et al., 1999).

Por ende, bajo esta problemática existen estudios, en donde se ha realizado las siembras de plantas que ayuda acumular mercurio en sus raíces, tejidos disminuyendo su impacto sobre el suelo.

En vista de esta problemática notamos cómo afecta directamente al suelo; por ello, se realizó el estudio de la planta garbancillo a fin disminuir la concentración de mercurio en el suelo contaminado por actividad minera, con un tiempo de duración de 62 días.

1.2. Justificación

Lora Silva & Bonilla Gutiérrez (2010) dan mención que la contaminación por metales pesados se debe tratar ya que estos elementos tóxicos tienen esa capacidad de quedar retenidos por procesos de adsorción, de complejación y de precipitación, ser absorbidos por las plantas y así incorporarse a las cadenas tróficas. Por esta razón pueden pasar a la atmosfera por

volatilización y moverse a las aguas superficiales y subterráneas; y provocar impactos negativos en el medio ambiente, animales y a la salud humana.

La presente investigación tiene el propósito disminuir la contaminación por mercurio en el suelo ya que este daña la fertilidad del suelo, afectando directamente a la pérdida de nutrientes. Por otro lado, la importancia de la recuperación del suelo ya que esta es una fuente de producción agrícola; por lo tanto, se está viendo afectada por la contaminación por mercurio que disminuye la calidad de suelo.

Realizando la experimentación o la eficiencia del garbancillo teniendo los resultados, a partir de este trabajo de investigación se podría realizar nuevos estudios de capacidad fitorremediadora con otras especies presentes en la zona de explotación aurífera para así tener un inventario de plantas acumuladoras que pueda ser empleada para remediar suelos contaminados con mercurio.

1.3. Presuposición Filosófica

Como hijos de Dios debemos conocer y saber lo que el creador indica en las sagradas escrituras; por tanto, se menciona dos declaraciones bíblicas fundamentales a tener presente, "Del Señor es la Tierra" (Salmo 24:1), y "A la humanidad el Señor le ha dado la Tierra" (Salmo 115:16).

Si lo leemos a primera vista o escucharlo, parecería que se contradicen, pero no es así, porque que estos pasajes bíblicos no se contradicen, sino que son complementarias y tienen una significancia.

La tierra le corresponde a Dios porque Él la creo, por ello nos pertenece a nosotros porque nos la otorgo. Esto no significa que nos la haya entregado renunciado a sus derechos sobre ella, sino que nos dio la responsabilidad de preservar y desarrollar la tierra, de cuidarla en su nombre.

Como en todo aspecto de la vida, es importante ser equilibrado y no caer en los extremos, por ejemplo, la excesiva explotación de los recursos naturales, que es lo que está sucediendo en estos tiempos donde la explotación está convirtiendo algo incontrolable por ello los hijos de Dios estamos siendo cómplices de lo que está pasando.

Bajo este contexto bíblico y como hijo de Dios estoy dispuesto a realizar actividades para el cuidado de la tierra, porque Dios nos las entrego en buenas condiciones para el desarrollo de la vida y por ello debemos entregárselo en condiciones iniciales. Doy gracias al creador por haberme dado la oportunidad de realizar dicha investigación por lo que pretende disminuir los contaminantes que afectan a los recursos que en este caso es el suelo.

1.4. Objetivo general

Evaluar la capacidad fitorremediadora del garbancillo (*Astragalus arequipensis*) en función de tres tipos de enmiendas orgánicas sobre la remoción de mercurio del suelo contaminado por la actividad minera del centro poblado La Rinconada-Región Puno, 2018.

1.4.1 Objetivos específicos

- Determinar la cantidad de mercurio en el suelo contaminado antes del tratamiento.
- Caracterizar las propiedades físico y químicas del suelo contaminado antes del tratamiento
- Determinar la cantidad de remoción del mercurio en el suelo después del tratamiento.
- Caracterizar las propiedades físico y químicas del suelo después del tratamiento

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedentes internacionales

Mireya (2016) de acuerdo a su investigación evaluó el potencial fitorremediadora de 3 tipos de especies de plantas para remover mercurio del suelo contaminado, para ello utilizó *Cecropia peltata* (Guarumo), *Medicago sativa* (Alfalfa) y *Arachis pintoi* (Maní Forrajero), en su investigación de tipo experimental construyó ensayos para el cultivo de las especies mencionadas de tal forma que se identificó. El seguimiento para la especie (Guarumo) se realizó cada 15 días durante 16 semanas, 12 semanas para (Alfalfa) y (Maní forrajero). Cada planta con un código numérico del 1 al 10 a fin de facilitar el monitoreo y control. En los resultados fueron, que la (Alfalfa) mostró mortalidad de todas sus plantas, por otro lado, el (Guarumo) presentó un grado de concentración de 60 mg/kg Hg, en cuanto al (Maní forrajero) presentó una concentración de 75 mg/kg. Hg. Siendo así la especie que más removió el contaminante.

Durango (2009) realizó una investigación que tuvo el propósito evaluar la capacidad de la especie guarumo (*Cecropia peltata*) como fitorremediadora de suelos contaminados con mercurio, dicho estudio se realizó en un invernadero de 5 x 4, por tanto, evaluó tres variables de concentración de Hg en suelos, primero crecimiento de la especie guarumo y de un agente quelante ácido cítrico, remoción de Hg en raíces, tallos y hojas, la metodología consistió en el trasplante de 40 plántulas en concentraciones altas de suelo contaminado, otro 40 plántulas a

concentraciones medias, el agente quelante mencionado se suministró una dosis de 1g/kg de suelo a 15 plántulas de cada grupo el experimento duro 4 meses. Los resultados que obtuvo después del tratamiento fueron que las tasas de remoción de mercurio expresas en porcentaje son de 15.7 y 33.7 %. Por lo tanto, se concluye dicha especie tiene a función de acumular el mercurio una cantidad considerable, por otro lado, el guarumo puede crecer en suelos erosionados es decir suelos ácidos con bajos niveles de materia orgánicas.

Prieto-García, Callejas, Ángeles, Gaytán, & Barrado (2005) realizaron una investigación, dicho estudio fue determinar la acumulación del arsénico en tejidos vegetales mencionado metal son provenientes de suelos y aguas que contienen altas concentraciones de arsénico natural, para ello utilizó especies vegetales incluyendo hortalizas, frutales, y plantas medicinales siendo un total de 29 especies de plantas, su método fue analizar las características de las aguas de diferentes pozo y para el muestro de suelos consideraron un área circular de 3 m alrededor de cada pozo, por ello también se tomaron muestras de los suelos donde se encontraban los diferentes cultivos.

Los resultados más relevantes de dicha investigación fue que la mayor remoción del arsénico fue en las hojas perejil y en la hoja del epazote sucesivo por su tallo y raíz, según su análisis bibliográfico menciona que las cantidades localizadas en los tejidos de especies son tóxicas ya que sobrepasan la dosis que es de 0.0105mg, no apta para el consumo humano. De tal forma donde sí hubo más mucha más presencia de arsénico fue las especies medicinales donde se presentó en hojas del Toronjil seguido por su tallo. Por ello se concluye que el toronjil tiene una capacidad de un 99% en la remoción de arsénico de un suelo.

Orroño (2002) en su investigación tuvo el objetivo estudiar la capacidad fitorremediadora de la especie *Pelargonium* en la remoción de metales pesados como Ni, Cd, Cu, Zn, Pb y Cr su experimento consistió en el uso de invernadero a condiciones controladas para ello, también utilizó contenedores (maceteros), las cuales fueron utilizadas para los tratamientos con un suelo control, lo que hizo fue enriquecer el suelo con metales pesados mencionados anteriormente con niveles medio (0,022g de $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 0,57g de H_2CrO_4 , 0,40g de $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 0,32g de $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 0,80g de $\text{N}_2\text{O}_6\text{Pb}$, 1,33g), el otro fue a nivel alto es decir el doble de cantidad, por tanto, el experimento duro 16 semanas. En los resultados obtenidos de su experimento utilizando dicha especie fue que acumuló metales pesados en las hojas, flores, raíz y tallo, asimismo también menciona que el metal cadmio se muestra bajo en las hojas y flores debido a que su desplazamiento esto lento. Por otro lado, indica que el plomo no sobrepasa límites de detección por lo tanto se muestra poca biodisponibilidad en el suelo.

2.1.2. Antecedentes nacionales.

Huayllani (2016) en su estudio realizado de fitorremediación en suelos contaminados por metales pesados tales como cadmio, arsénico, cadmio, plomo y mercurio, su experimento consistió evaluar los metales mencionados en hojas, tallos y raíces en distintas especies de plantas como *Ceiba pentandra*, *Apeiba erythrina ulei*, *Ochroma pyramidale* y *membranácea*, mencionadas especies se estableció en áreas contaminadas por la minería ubicada en Madre de Dios. Su experimento inició en precipitaciones por el mes diciembre del año 2013, utilizó 1111 plántulas de diferentes especies las cuales fueron trasplantadas aleatorio en una superficie de 1 ha, para ello se estableció en 4 parcelas y 12 subparcelas, una vez terminado el experimento llegó a la conclusión que las especies utilizadas y establecidas en las áreas contaminadas de la mina dio como resultado que la especie empleada *Erythrina ulei* y *Ceiba pentandra* fueron las

que mayor removieron mercurio para la especie *Ceiba Pentrandra* es la que más acumulo mercurio en su tallo con un resultado de 4.26 mg/kg. por este motivo, dicha especie que acumuló más mercurio se le puede considerar como una especie fitorremediadora del metal mercurio.

Rodrigo (2018) en su investigación tuvo el objetivo determinar la cantidad de plomo y cromo, removido en suelos de industria metalmecánica, usando maíz (*Zea mays*) y girasol (*Helianthus annus*) con diferentes enmiendas orgánicas, mediante método de fitorremediación en la región de Junín, su experimento consistió en seis tratamientos con enmiendas y dos usando como testigos sin enmiendas, es decir 8 tratamientos con 3 repeticiones haciendo un total de 24 pruebas. Las enmiendas que se utilizó fue humus y compost, el tiempo de duración del tratamiento fue de 64 días.

Los resultados que obtuvo después del tratamiento se determinaron que la remoción de estos metales pesados del suelo contaminado fue que la especie de maíz (*Zea mays*) obtuvo un valor de 76.22 mg/kg de plomo en su biomasa radicular y para el metal cromo solo se obtuvo un valor de 2.18 mg/kg en masa radicular; y para la especie girasol su mayor remoción es de 14.72 ppm para plomo en biomasa radicular y 1.83 ppm para cromo en masa radicular. De tal modo el metal cromo fue removido en un 11% a comparación de plomo que fue de 9.95% de remoción por parte de las dos especies de plantas, llegando a la conclusión que la especie maíz usando compost y humus fue la que tuvo más eficiencia en la remoción de los metales mencionados anteriormente.

Grandez (2017) Su investigación fue evaluar el potencial fitorremediadora de la especie *Helianthus annuus* usando enmiendas orgánicas en suelos industriales contaminados con cadmio (Cd) y plomo (Pb). Su método consistió en 4 tratamientos con 3 repeticiones siendo un

total de 12 ensayos, de tal forma su experimento tuvo como duración de 60 días, las enmiendas que se utilizó en dicho experimento fue guano de isla y suelo agrícola, estas fueron mezcladas con el suelo contaminado. Los resultados que se obtuvieron después del tratamiento fue que en los tratamientos tres y cuatro removi6 plomo con un valor de 75.54 ppm y 46.09 ppm, el análisis en planta tuvo como resultado de 50.70 ppm y 41.30 ppm de plomo en los tratamientos tres y cuatro. En conclusión, los tratamientos tres y cuatro fueron las más removieron plomo y cadmio.

2.2. Revisión de literatura

2.2.1 Suelo

El suelo es un medio dinámico y un recurso natural más aún está compuesto por los componentes minerales (arcilla, limo y arena) también participan el agua y aire, dicho recurso desempeña diversas funciones en la superficie de la tierra, facilitando la interacción de actividades bioquímicas y físicas, así como nutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas y micro-organismos. Por tanto, los minerales son los principales elementos del suelo que contribuyen más del 50% del volumen total de dicho recurso (Volke, & Velasco, 2002).

2.2.2 Potencial de hidrogenación

El pH del suelo es una medida de la alcalinidad o acidez es escala de 0 (siendo lo más ácido hasta 14 (siendo lo más básico o alcalino), el pH tiene mucha influencia sobre las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo ya que esta influye directamente en el crecimiento de la planta afectando a sus procesos biológicos. Por ende, el pH expresa la concentración afectiva de iones H en solución del suelo ver tabla 1.

Por otro lado Galan & Romeo (2008) dan mención que la mayoría de los metales pesados tienden a estar más disponibles a pH ácido porque son menos fuertemente adsorbidos, excepto As, Mo, Se y Cr que son más móviles a pH alcalino.

Tabla 1

Clasificación de suelos de acuerdo a su pH.

pH	Evaluación
<4.5	Extremadamente ácido
4.5 - 5.0	Muy fuertemente ácido
5.1 - 5.5	Fuertemente ácido
5.6 - 6.0	Medianamente ácido
6.1 – 6.5	Ligeramente ácido
6.6 – 7.3	Neutro
7.4 – 7.8	Medianamente básico
7.9 – 8.4	Básico
8.5 – 9.0	Ligeramente alcalino
9.1 – 10.0	Alcalino
10	Fuertemente alcalino

Fuente: Manual de prácticas de suelo (Carbo & Bautinza, 2008).

2.2.3 Materia orgánica

La materia orgánica compuesta de los desechos y restos de animales y vegetales descompuestos. Por lo tanto, la MO tiende a reaccionar con metales generando complejos o más conocido como quelatos, por otra parte, la materia orgánica favorece la estructura del suelo permitiéndole la

retención de nutrientes, y retención de agua sobre todo en suelos arenosos, incluso provee energía a los microorganismos (Galan & Romeo, 2008) ver tabla 2.

Tabla 2

Contenido de materia orgánica en suelos.

Clasificación	Contenido en %
Bajo	menos de 2
Medio	2 – 4
Alto	más de 4

Fuente: *Manual de prácticas de suelo (Carbo & Bautinza, 2008).*

2.2.4 Conductividad eléctrica

La conductividad es una medida de la cualidad que poseen las soluciones acuosas a fin de conducir la corriente eléctrica esto dependerá, además del voltaje aplicado, del tipo, número, carga y movilidad de los iones presentes y de la viscosidad del medio en el que éstos han de moverse. En disoluciones acuosas, y puesto que su viscosidad disminuye con la temperatura, la facilidad de transporte iónico o conductividad aumentará a medida que se eleva la temperatura (Delgado & Casanova, 2005) ver tabla 3.

Tabla 3

Clasificación de suelos por su conductividad eléctrica.

Clase	S/m (mmhos/cm)	Categoría de suelos para crecimiento de plantas
No salino	0 – 2	Normal
Muy ligeramente salino	2 – 4	Normal
Ligeramente salino	4 – 8	Salino
Moderadamente salino	8 – 16	Salino
Fuertemente salino	más de 16	Salino

Fuente: Manual de levantamiento de suelos (1997).

La conductividad eléctrica es determinada con un conductímetro es imprescindible adaptar la temperatura en relación de 25° C; por lo tanto, el incremento de salinidad puede aumentar la movilización de los metales pesados en lugares de intercambio catiónico. En la segunda fase, los aniones, cloruro y fosfato pueden crear compuestos más estables con metales como Hg, Zn, Cd, Pb (Galan & Romeo, 2008).

2.2.5 Textura del suelo

La textura del suelo se relaciona a la cantidad de componentes inorgánicos de distintas formas y tamaños tales como arena, limo y arcilla. La textura es una propiedad fundamental ya que actúa como factor de fertilidad y habilidad de conservar agua, aireación, drenaje, contenido de materia orgánica y otras propiedades. (FAO,Atlas, 2014).

Por otro lado, el triángulo de textura de suelos según la FAO se emplea como una técnica para categorizar la textura es decir partículas del suelo que sobrepasan el tamaño de 2.0 mm se determina como piedra y grava y también se incorporan en la clase de textura. Asimismo, en el momento que aparecen componentes orgánicos se forman suelos orgánicos (FAO, 2016) ver figura 1.

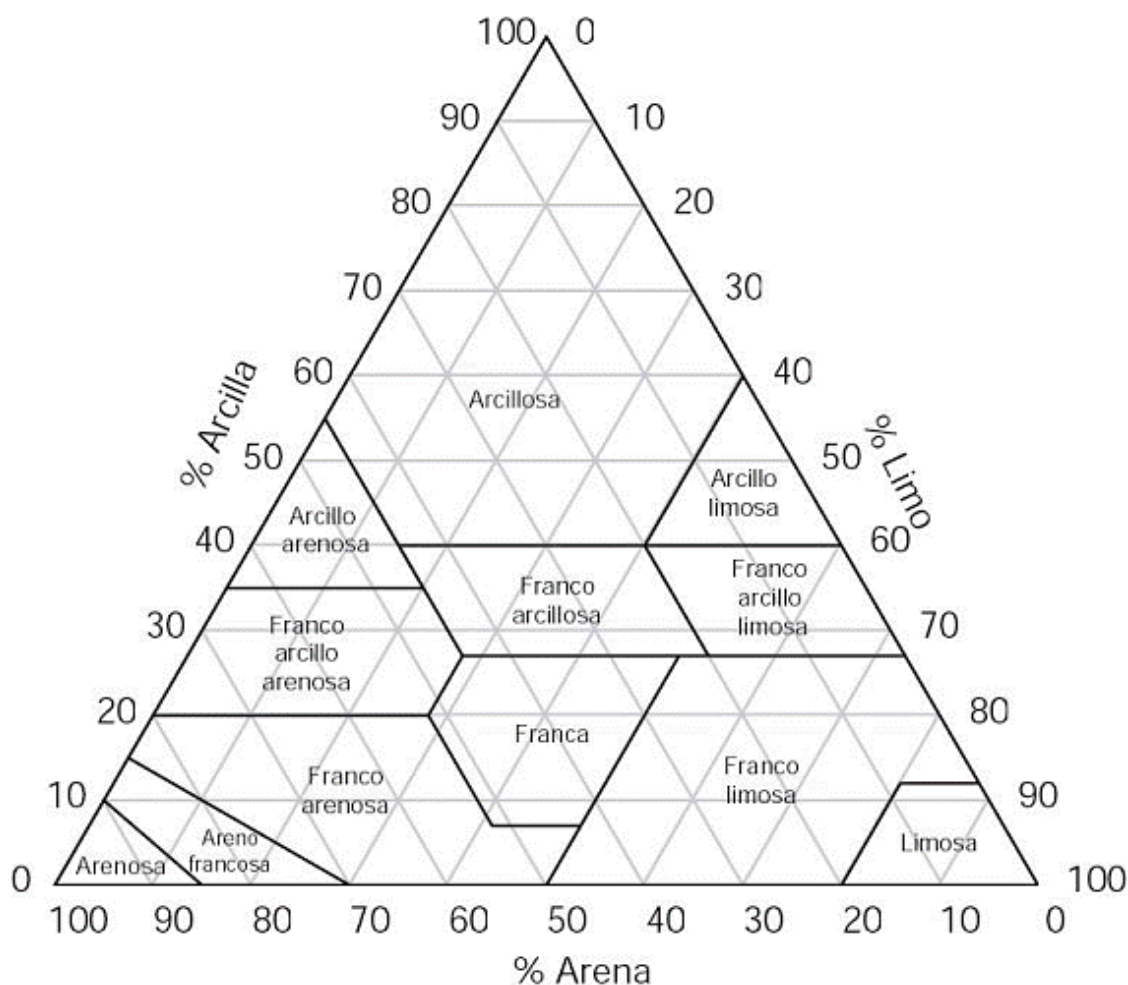


Figura 1. Triángulo textural de suelo.

Fuente: Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.

2.2.6 Mercurio

El mercurio como tal es utilizado para numerosos acciones desde tiempos antiguos, actualmente se ve que el mercurio es un contaminante mundial, asimismo cuando dicho metal es expulsado en el medio ambiente en estado gaseoso, este es transportado con las corrientes de aire hasta llegar nuevamente al suelo, en esta fase es donde los microorganismos tiene la capacidad de transformarlo en metilmercurio, de tal forma este compuesto de mercurio es más tóxico a bajas concentraciones que el mercurio en su estado elemental (Weinberg, 2007).

Por lo tanto, una vez que el Hg este depositado en el suelo, está sujeta a reacciones bioquímicas, es decir a condiciones de temperatura, pH, contenidos de sales y compuestos orgánicos del mismo suelo que favorecen la formación de complejos del ion inorgánico (Hg^{2+}) como cloruro de mercurio (HgCl_2), Hidróxido de mercurio ($\text{Hg}(\text{OH})_2$) o llamados también complejos orgánicos. Sin embargo, estos complejos inorgánicos formados son fácilmente solubles en agua y muchos de ellos forman nuevos complejos con las moléculas orgánicas formando principalmente con los ácidos húmicos y fúlvicos. Por este motivo los complejos formados son las que definen el comportamiento del mercurio (Cabañero, 2005).

2.2.7 Propiedades físicas químicas del mercurio

El mercurio elemento químico Hg, es un metal brillante color plateado, que se puede ser encontrado a temperatura ambiente en estado líquido: su temperatura de fusión es de -38.9°C y su temperatura de ebullición es 357.7°C . Su peso específico es de 13.6 g/cm^3 (0°C). por tanto, el mercurio debido a su composición, generalmente se evapora a temperatura ambiental a 20°C por ello su concentración en el aire puede alcanzar hasta 0.014 g/m^3 y a 100°C hasta 2.4 g/m^3 . comúnmente se habla del gas de mercurio elemental que se encuentra presente en la atmosfera (Khatoonabadi. A, Abadi, Hoseini, & Khalili, 2008).

2.2.8 El ciclo del mercurio

Este ciclo está basado normalmente en el comportamiento del Hg por lo común es de flujo continuo ya que esta entre la atmósfera, tierra y agua, cada medio está relacionado a los otros por una serie de ciclos biogeoquímicos que se controlan por la especiación y el flujo del mercurio; por ende, este ciclo del mercurio en el ambiente estará basado en función global natural, o del ciclo global interrumpido por la actividad humana y por las fuentes de mercurio.(Martínez, 2004).

Por tanto, el mercurio representa el 8.5×10^{-6} % en peso de la corteza raramente se halla libre en la naturaleza. El cinabrio (HgS) es el mineral más considerable para la obtención del mercurio. Otros minerales de mercurio son la livingstonita ($\text{HgS} \cdot 2\text{Sb}_2\text{S}_3$), el calomelanos (Hg_2Cl_2), la tiemannita, (HgSe) y la coloradoita (HgTe). La tetraedrita de mercurio. La zona geológica enriquecidas con mercurio están relacionadas con los límites de placas, mineralizaciones por vulcanismo recientes de metales preciosos y altos flujos de calor. (Martínez, 2004).

Los depósitos de mercurio pueden clasificarse en 3 grandes grupos: a) Almadén, b) silícico-carbonatados y c) hot spring, los depósitos de Almadén son más grandes depósitos y de alta calidad; contienen cinabrio masivo y según estudios es probable que los cuerpos mineralizados hayan sido formados por vulcanismo submarino máfico. Los depósitos silícico-carbonatados están espacialmente asociados con serpentinitas alteradas a una asociación de minerales carbonatados y sílice, generalmente son pequeños, de 0.1 a 10 millones de toneladas métricas de mena y con espesores de veta de 0.5 a 10 metros. Los depósitos tipo hot spring están relacionados a zonas volcánicas formados cerca de la superficie; su tonelaje métrico de mena es de 10 a 100 millones y sus espesores de veta más de diez metros de ancho (Martínez, 2004).

2.2.9 Contaminación de suelos por mercurio

Por otro lado, si bien es cierto en los últimos 125 años se han emanado a la atmosfera casi 200.000 toneladas de Hg, en consecuencia el 95% ha sido depositado en la superficie terrestre, convirtiéndose en una continua fuente de mercurio, (Cabañero, 2005).

Es por eso que la contaminación por Hg es el principal problema ambiental que ocasiona la minería artesanal. Por el uso indiscriminado e ineficiente del mercurio para alear el oro, ocasiona

que grandes cantidades de mercurio se pierdan y se viertan al medioambiente en forma líquida o en gases. Por ello se estima que cada año se pierden aproximadamente 70 toneladas anuales de mercurio líquido en la zona del sur medio y alrededor de 15 toneladas en zona de Puno (Mosquera et al., 1999).

2.2.10 Efecto del mercurio en la salud

El mercurio es un elemento que está presente en todas partes, debido a ello las personas están expuestas en forma frecuente (Valko, 2005). Por lo tanto, existen elementos que identifican la exposición al mercurio ocasionara efectos negativos. La cantidad, la permanencia, la vía de exposición, el sexo, la dieta, la edad el estilo de vida y la condición de salud (Ward, 2010 & Christophe, 2012).

Por tanto el compuesto mercurio y de iones son más solubles en grasas y por ello fácilmente absorbibles (Ming-Ho, 2005). En consecuencia, a esta cualidad pueden retenerse o almacenarse en los tejidos de organismos de los seres vivos y por consecuencia magnificarse y almacenarse en la cadena alimentaria (Méndez et al., 2009). De tal modo su característica lipofílica por ello el mercurio en estado gaseoso elemental entra al organismo, una vez dentro se hacia la grasa, cuando el vapor de mercurio elemental entra al organismo, se esparce en el cuerpo a través de la sangre. Fácilmente puede atravesar la barrera hematoencefálica (Khatoonabadi, 2008).

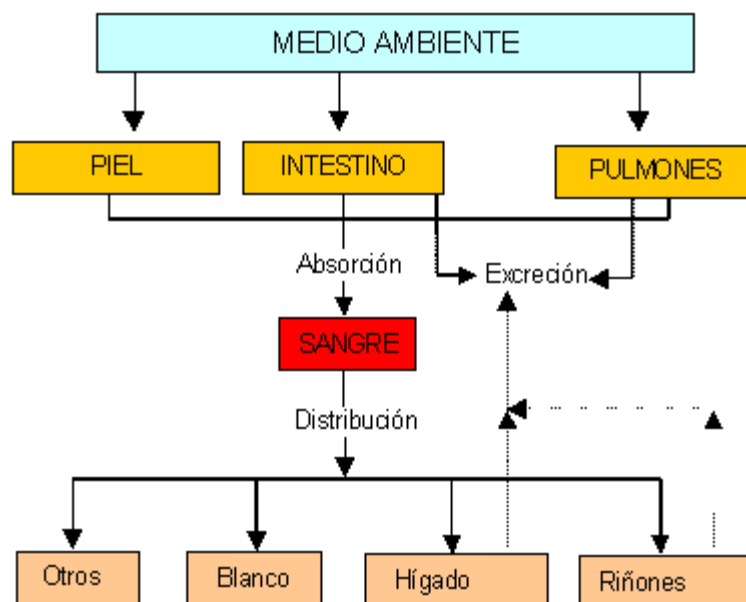


Figura 2. Vías de exposición al mercurio, del organismo humano.

Fuente: Chien (2006).

Por ello dosis altas de mercurio, afectará al sistema nervioso central y periférico dando lugar a síntomas una de las principales síntomas en las primeras etapas es debilidad neuromuscular y luego pasa a dolores de cabeza intenso, pequeños temblores en los dedos, labios y parpados (Timbrell, 2009) Al transcurrir el tiempo la intoxicación acelera como consecuencia ella a una etapa donde las síntomas más frecuentes e incontrolables como temblor, gingivitis y eretismo (Poulin, Gibb, & Prüss-Üstün, 2008). De tal forma llegando a un punto de pérdida de habla, pérdida de memoria a corto plazo y anorexia, fatiga, irritabilidad, ansiedad e histeria (Teaf M, 2012).

Por otro lado, el mercurio también puede almacenarse y causar difusión en las toroides, afectando a los tejidos musculares del corazón, el hígado, los riñones, los pulmones, las glándulas salivales, los testículos y la próstata (PNUMA, 2007)

Las concentraciones de metil-mercurio, se ve más reflejado en el embrión que en la madre, dado que la afinidad del compuesto por el tejido fetal y su capacidad de pasar la barrera placentaria. Por ello el desarrollo del cerebro del feto es particularmente es muy sensible al metilmercurio. El feto expuesto intrauterinamente al metil-mercurio, posteriormente tiene la probabilidad de mostrar al algún defecto puede mostrar retraso en su desarrollo, falta de coordinación y retraso mental (ATSDR, 2009).

Por ende, el mercurio tiene varios efectos adversos sobre la salud y sus compuestos son altamente tóxicos, especialmente para el sistema nervioso en desarrollo también malformaciones congénitas e incluso la muerte.

El Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España (2012) menciona que la principal vía de exposición es por inhalación de vapores que son absorbidos por los tejidos pulmonares, inhalar esta sustancia continuamente puede causar trastornos neurológicos y de comportamiento, los sistemas asociados son temblores, desequilibrio del sueño, pérdida de memoria, cambios en sistema neuromuscular, dolores de cabeza y puede afectar también los riñones y la tiroides.

2.2.11 Fitorremediación de suelos contaminados

Es una técnica de usar diferentes tipos de plantas que tienen la capacidad de estimular, estabilizar, degradar, remover contaminantes, siendo una tecnología de mayor uso y de menor costo, el proceso de fitorremediación está situado en función de los procesos biológicos, químicos o físicos, estimulado por las plantas, con la finalidad de que ayude en la remoción, metabolización, absorción de los contaminantes, ya sea por las mismas plantas o por los microorganismos degradadores del contaminante (Merkl, 2004).

En la actualidad la remediación de suelos contaminados con mercurio, son tratadas o existen técnicas químicas como el lavado del suelo con sustancias halogenadas, y físicas, como la excavación, electro remediación y tratamiento térmico; pero que pueden llegar a ser muy costosas y además causan daños en el ambiente ya deteriorado por esta razón las técnicas de biológicas son de gran utilidad ante esta problemática, de tal forma una de ellas es la fitorremediación. este método es utilizado para remover, transferir, estabilizar o transformar dichos contaminantes a menos tóxicas para los seres vivos (Serrano, 2006).

Por otra parte, Méndez (2009) menciona que la fitorremediación tiene la función de utilizar esa capacidad de ciertas especies de plantas para remover, absorber, metabolizar, acumular, estabilizar los contaminantes que están presente en el suelo tales como metales pesados, compuestos orgánicos, metales radioactivos y compuestos derivados del petróleo. Por tanto, estas tecnologías o métodos de fitotecnologías brindan muchas ventajas a comparación de otros métodos que se usa en la actualidad.

Por ende, la fitorremediación engloba un grupo de técnicas emergentes basadas en el manejo de especies vegetales y sus microorganismos asociados para extraer, acumular, inmovilizar o transformar los contaminantes del suelo de forma natural a estos para la remoción e inactividad de los contaminantes tóxicos (Pilon - Smits, 2005).

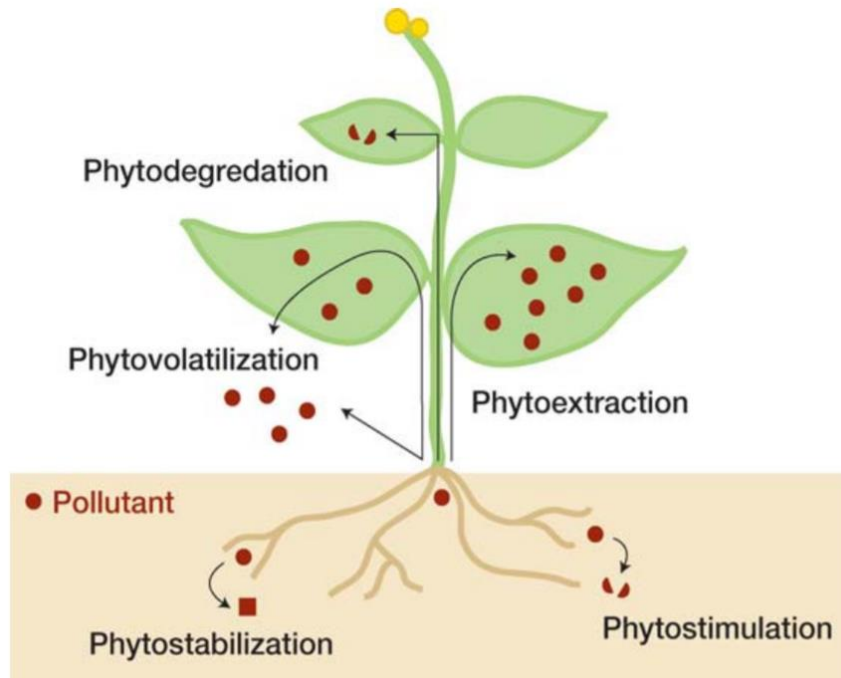


Figura 3. Tipos de fitorremediación.

Fuente: Pilon-Smits (2005).

2.2.12 Fitoextracción

Es una tecnología que utiliza las plantas para remover, degradar o inmovilizar compuestos contaminantes en el suelo por tanto esta tecnología es a largo plazo, para remover por completo el sitio contaminado se requerirá el uso de varios ciclos de cultivo de la especie. El tiempo necesario para la mencionada tecnología dependerá mucho la concentración del contaminante en el suelo, por esa razón la duración de la etapa del crecimiento y de la eficiencia de remoción de la planta utilizada puede tomarse uno y veinte años (Prasad & Freitas, 2003).

Por otro lado, esta metodología de saneamiento aplicada a suelos contaminados por metales pesados u otro agente, que, por medio de procesos naturales de la planta, presenta ventajas que favorecen al ambiente ecológico, ventajas en lo económico. Esta tecnología de remoción

depende principalmente, de las condiciones del suelo y de la planta que acumulara el contaminante (Pulford & Watson, 2002).

Por lo tanto, para optimizar el proceso de Fito-extracción, la asimilación del contaminante hacia las raíces se puede facilitar a través de la adición de agentes quelantes, fertilizantes o acidificantes (Prasad & Freitas, 2003).

2.2.13 Fitoestabilización

Es el uso de plantas para conseguir disminuir el riesgo de movilización y transferencia de los contaminantes, por ejemplo, mediante la acumulación de elementos traza en la raíz o mediante su precipitación en el suelo (Peer, Baxter, Richards, Freeman, & Murphy, 2006). Las plantas que crecen en los emplazamientos contaminados ayudan a estabilizar el suelo reduciendo la dispersión de elementos traza por aire o agua además de evitar un contacto directo entre los contaminantes y los seres vivos.

Uno de los mecanismos fisiológicos de gran importancia en la fitoestabilización es la liberación de compuestos químicos por las plantas (Kidd et al., 2009). La rizosfera es un medio que se modifica continuamente por la interacción planta-suelo-microorganismo y su acidificación es un proceso determinante en la in/movilización de elementos traza. Los compuestos excretados por las raíces (aminoácidos, ácidos carboxílicos, azúcares, flavonoides, fenoles) pueden formar complejos estables con metales catiónicos y modificar su disponibilidad en el suelo. La fitoextracción ha sido desplazada progresivamente por la fitoestabilización, de forma que la mayoría de los trabajos en fitorremediación en los que no participa una especie hiperacumuladora contemplan la fitoestabilización como la técnica principal.

2.2.14 Fitovolatilización

Este tipo de fitorremediación tiene la función de absorber los contaminantes y transformarlos en fase diferente a lo que estaba al inicio es decir de fase líquida a gaseosa (Pilon-Smith, 2005)

2.2.15 Fitoestimulación

La estimulación tiene mucho que ver con la degradación microbiana por medio del efecto de exudados de plantas (Pilon-Smits, 2005).

Por otro lado, la fitoestimulación compromete la estimulación de la degradación por microorganismos a través de la actividad de la planta en la rizosfera (USEPA, 2000a).

2.2.16 Rizofiltración

La rizofiltración está relacionada con el uso de especies de plantas crecidas en cultivos usando disoluciones minerales en vez de suelo agrícola tiene esa función de que las plantas no sólo se absorben sino también se concentran y precipitan los contaminantes (López & Rojas, 2005).

2.2.17 Ventajas y limitaciones de la fitorremediación

Entre las cualidades mencionadas las plantas empleadas para la fitorremediación de contaminantes presente en el suelo como es el caso del mercurio de tal modo se debe una rizósfera que crea una gran área superficial donde el contaminante puede ser capturado en sus formas químicas móviles; son autótrofas, es decir adquieren sus nutrientes esenciales directamente del ambiente; y secretan compuestos fijadores de carbono hacia el suelo, promoviendo el desarrollo de bacterias y hongos que pueden ser esenciales para recuperar el ecosistema (Evans, 2005).

La ventaja más importante de la fitorremediación es que se puede desarrollarse in situ es decir en el mismo lugar de contaminación, siendo de costos menores, con un mínimo mantenimiento de toda fase del tratamiento, así mismo se evita la excavación, mejorando la fertilidad del suelo y con posibilidad alta de crecer nueva vegetación (Evans, 2005).

La fitorremediación tiene ciertas limitaciones como las raíces de la planta pueden ser de unos centímetros, factores climáticos, la estación del año. Asimismo, este método es adaptable con concentraciones bajas o moderadas; y tiene la posibilidad incorporar los contaminantes a la cadena trófica y de expulsar al ambiente por medio de la volatilización de éstos por medio de las hojas (Evans, 2005).

Otra limitante de esta tecnología de fitorremediación es el tiempo que tardará de remediar el sitio contaminado, para ello dependerá de muchos factores por esta razón puede estar en periodos cortos o largos es decir entre uno a veinte años, por lo que puede demandar varios ciclos de cultivo de la especie a fin de reducir la concentración de los agentes contaminantes a niveles aceptables. Por lo tanto, en la actualidad se vienen aplicando métodos tales como químicos y biotecnologías que permiten que las tasas de acumulación de mercurio, de igual manera que especies con poca interacción con las cadenas tróficas. (Zhou, Wang, Zhang, & Gao, 2004).

2.2.18 Mecanismos de fitorremediación

La remoción de agentes contaminantes se dará por medio de la fitorremediación, por ello este método se realizará empleando diferentes mecanismos que se mostrará a continuación.

Tabla 4

Mecanismos de fitorremediación.

Tipo	Proceso involucrado	Contaminación tarada
Fito-extracción	Estas distintas especies de plantas son más utilizadas para concentrar los metales pesados en las partes de la raíz y hojas	Cromo, plomo, níquel, cadmio, cobalto, mercurio, zinc, plomo, selenio.
Rizo-filtración	Las raíces tienen la función de absorber, precipitar y concentrar metales pesados a partir de efluentes líquidos, suelos contaminados a fin de degradar compuestos orgánicos.	Plomo, zinc, mercurio, cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercurio, selenio, isótopos radioactivos y compuestos fenólicos
Fito-estabilización	Las especies de plantas tolerantes a metales pesados se usan para reducir el movimiento de los mismos y evitando la propagación de estos hacia las capas subterráneas o la atmosfera.	Propuesto para compuestos clorados y fenólicos.
Fito-estimulación	Se usan los exudados radiculares es decir sustancias liberadas alrededor del medio por las raíces por lo tanto están presentes en la rizosfera a fin de promover el desarrollo de microorganismos degradativos (bacterias y hongos)	Hidrocarburos, poliaromáticos, tolueno, benceno, atrazina, etc.
Fito-volatilización	Las plantas tienen la función de captar y modificar metales pesados o compuestos orgánicos y liberan a la atmósfera con la transpiración.	Selenio, mercurio, y solventes clorados (tetraclorometano y triclorometano).
Fito-degradación	Las plantas ya sean terrestres o acuáticas, tiene la función de almacenar y degradar compuestos orgánicos a fin de proporcionar subproductos menos tóxicos o no tóxicos	Munición electroquímica como (TNT, DNT, RDX, nitrobenzén, nitrotolueno), solventes, atrazina, clorados, DDT, fosfatados, pesticidas, fenoles y nitrilos, etc.

Fuente: Cristian Frers (2014).

2.2.19 Garbancillo (*Astragalus arequipensis*)

Esta especie de *Astragalus arequipensis* está registrado en el herbario del museo parisino con el nombre *Astragalus arequipensis vogel*, cuenta con el número de registro de P00542165, de manera que fue reconocida por la bióloga argentina Edith Gomez-Sosa (1992) por ello se cuenta clasificada de la siguiente forma.

Tabla 5

Identificación botánica del garbancillo (Astragalus arequipensis).

<i>Astragalus arequipensis</i> (garbancillo)	
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Subclase	Rosidae
Familia	Fabaceae
Género	<i>Astragalus</i>
Especie	<i>Astragalus arequipensis</i>

Fuente: Gómez (1992).



Figura 4. Espécimen vegetal de Astragalus arequipensis.

Fuente: Elaboración propia (2018).

Por lo tanto, esta especie crece en los parajes alto andino de Perú, Bolivia y Argentina entre 3,000 a 5,000 m.s.n.m y son resistentes a sequías (Espinoza, 1991). En los diferentes países como: Perú, Bolivia y Chile las especies de este género son considerados como mala hierba porque estas plantas son venenosas para los animales que lo consumen (Hurtado, 2017).

Knight & Walter (2001) manifiestan que los animales desarrollan cierta preferencia hacia estas plantas, supuestamente porque tienen un sabor agradable, sin llegar a existir dependencia hacia la planta por lo que no se puede hablar de adicción.

2.2.20 Enmiendas orgánicas

Las enmiendas orgánicas es definida como residuos de origen animal y vegetal, el empleo de enmiendas orgánicas es esencial en productos orgánicos, de manera que, al adicionarlas al suelo mejoran las características fisicoquímicas y biológicas del mismo (Sperberg & Hirzel, 2016).

2.2.21 Estiércol

El estiércol está compuesto de una mezcla del excremento y líquido del ganado, dado por un proceso de digestión, para obtener una buena calidad de estiércol depende del forraje que consume el ganado, el estiércol es muy usado por los agricultores ya que esta cuenta con bastante materia orgánicas y un porcentaje de nutrientes que ayudara a mejorar la estructura del suelo (Iñiguez, 2007).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ámbito de estudio

El experimento se llevó a cabo en una vivienda ubicada en el pasaje los Laureles Urbanización Santiago Ríos manzana B5 Lote 18. Distrito de Juliaca-Región Puno, Perú.

Los análisis físico y químicos del suelo se realizaron en el laboratorio de suelo del Instituto Nacional de Innovación Agraria, Estación Experimental Agraria Illpa, Puno y para el análisis del mercurio se realizó en el laboratorio RHLab ubicada en la ciudad de Juliaca.

3.2. Diseño y tipo de investigación

Según Roldán (2008) menciona que, el diseño de investigación constituye el plan general del investigador para obtener respuestas a sus interrogantes o comprobar la hipótesis de investigación. Así mismo, el diseño de investigación desglosa las estrategias básicas que el investigador adopta para generar información exacta e interpretable. Es decir que los diseños de investigación son estrategias con las que intentamos obtener respuestas o preguntas como contar, medir o describir. De tal forma que, el diseño o estudios investigación se categoriza en 2 tipos, diseños experimentales y no experimentales.

De acuerdo con lo establecido la presente investigación se enfocó dentro de la modalidad de diseño experimental con diseño completamente aleatorio (DCA) ya que se determinará si existe

una diferencia significativa entre los tratamientos, por ello se manipularán la variable independiente y ver cómo influye en la variable dependiente.

3.3. Materias primas

Tabla 6

Materias primas para el proceso experimental.

Materias primas	Cantidad
Plántulas de garbancillo	60 unidades
Suelo contaminado	64 kg
Lombricompost	2.5 kg
Estiércol de bovino	2.5 kg
Estiércol de oveja	2.5 kg

Fuente: Elaboración propia (2018).

Las enmiendas orgánicas se utilizaron a fin de mejorar sus características físicas, químicas del suelo conjuntamente con la planta fitorremediadora, estos tienen diversos orígenes y composición, son comúnmente utilizados en este propósito, por sus características físicas y químicas.

3.4. Materiales y equipos

3.4.1. Materiales

Tabla 7

Materiales a usar para el proceso experimental.

Materiales escritorio	Materiales EPP	Materiales de campo
Cinta métrica	Zapatos de seguridad	Wincha de 100 metros
Tablero	Mascarilla	Bolsas herméticas
Lápiz	Chaleco	Balanza
Calculadora científica	Guantes quirúrgicos	Pala
Papel bond	Mandil	Pico
Plumones indelebles	Casco	Cintra métrica
Cinta embalaje	Linterna	Espátula
		Cámara fotografía
Lapiceros	Guantes de trabajo	GPS

Fuente: Elaboración propia (2018).

3.5.1. Equipos

- Computadora
- GPS
- Cámara fotográfica
- Balanza analítica
- Espectrofotómetro de absorción atómica
- Fotómetro de llama
- Potenciómetro
- Horno eléctrico de 150 °C
- Agitador vaivén
- Agitador de bouyoucos

3.5. Procedimiento del diseño experimental

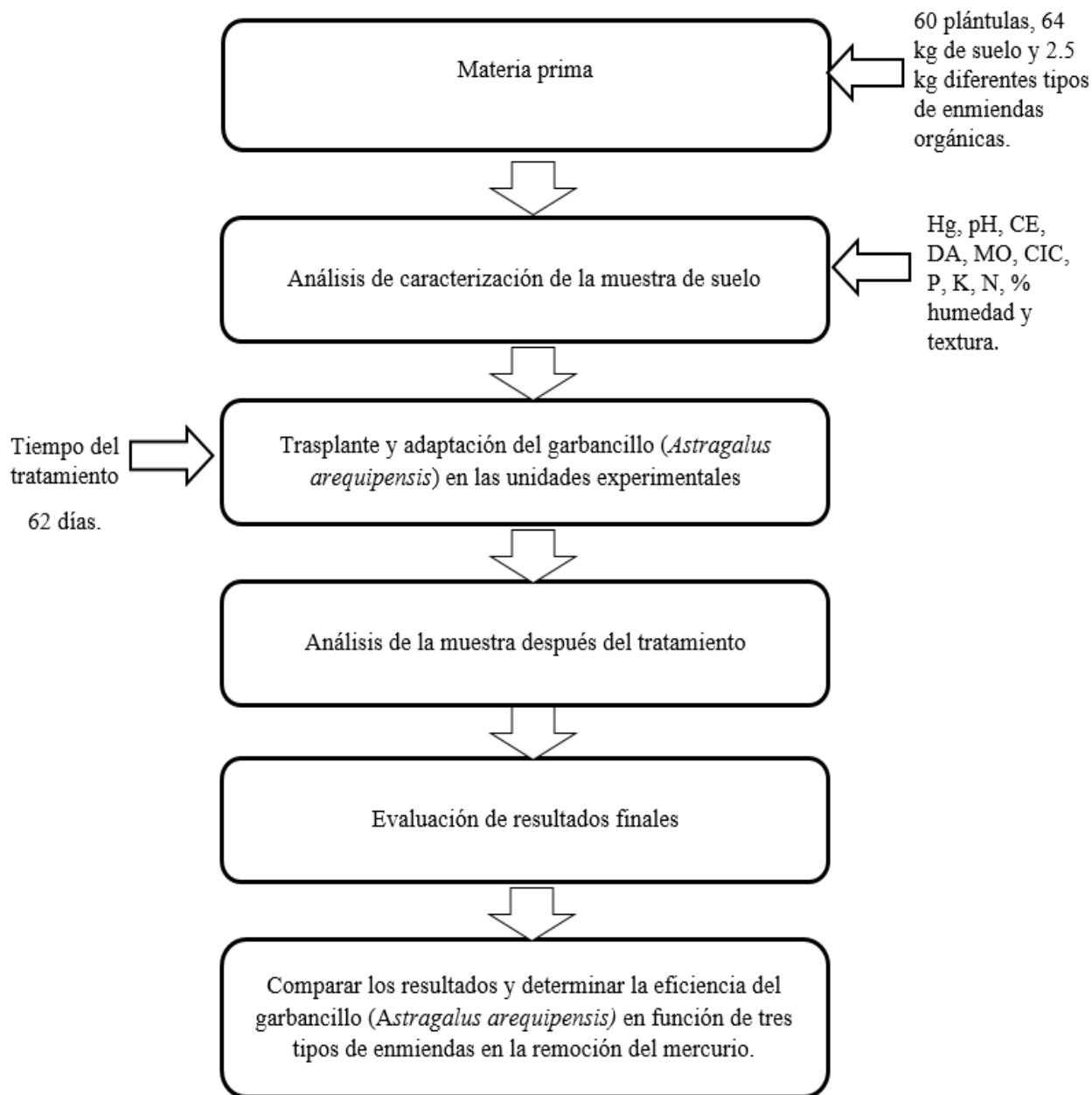


Figura 5. Procedimiento del diseño experimental.

Fuente: Elaboración propia 2018.

3.6. Metodología experimental

3.6.1. Muestreo de suelo

Para el muestreo se consideró la guía para muestreo de suelos en el marco del Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM para suelo.

El D.S. 011-2017-MINAM, reglamenta los estándares de calidad ambiental (ECA) para mercurio, donde se muestra en la siguiente tabla 5.

Tabla 8

Estándares de calidad ambiental para suelo.

N°	Parámetros	Usos del suelo			Método de Ensayo
		Suelo Agrícola	Suelo Residencial/Parques	Suelo Comercial/Industrial /Extractivos	
II		Inorgánicos			
20	Mercurio total (mg/kg MS) ⁽²⁾	6,6	6,6	24	EPA 7471-B

Fuente: D.S. 011-2017-MINAM, (2017)

3.6.2. Tipo de muestreo

Se realizó el muestreo de comprobación de la remediación (MC). El cual tiene como propósito demostrar que las actividades a realizar de remediación aplicada en un suelo contaminado, alcanzará de forma estadísticamente demostrable. Para ello se utilizó el método rectángulo para áreas contaminadas según la guía para muestreo de suelo del Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM.

Por lo tanto, la remediación consiste en la remoción de suelos contaminados, de tal forma se muestra seguidamente el procedimiento para la determinación de los puntos de muestreo en el área de excavación

3.6.3. Área de muestreo

La zona de estudio está ubicada en la región de Puno provincia de San Antonio de Putina distrito Ananea centro poblado La Rinconada sector Antahuila. El muestreo se realizó en un área total de 1000 m², donde los puntos de muestreo y cantidad se indica a continuación, una muestra en cada pared corta, dos en cada pared larga y dos en el fondo, siendo un total 8 muestras que consta de 8 kg por cada punto de muestreo (Ver figura 6).

3.6.4. Delimitación geográfica

Tabla 9

Delimitación geográfica.

Departamento	Puno
Provincia	San Antonio de Putina
Distrito	Ananea
Centro poblado	Rinconada
Sector	Antahuila
Área total	1000 m ²

Fuente: Elaboración propia 2018.

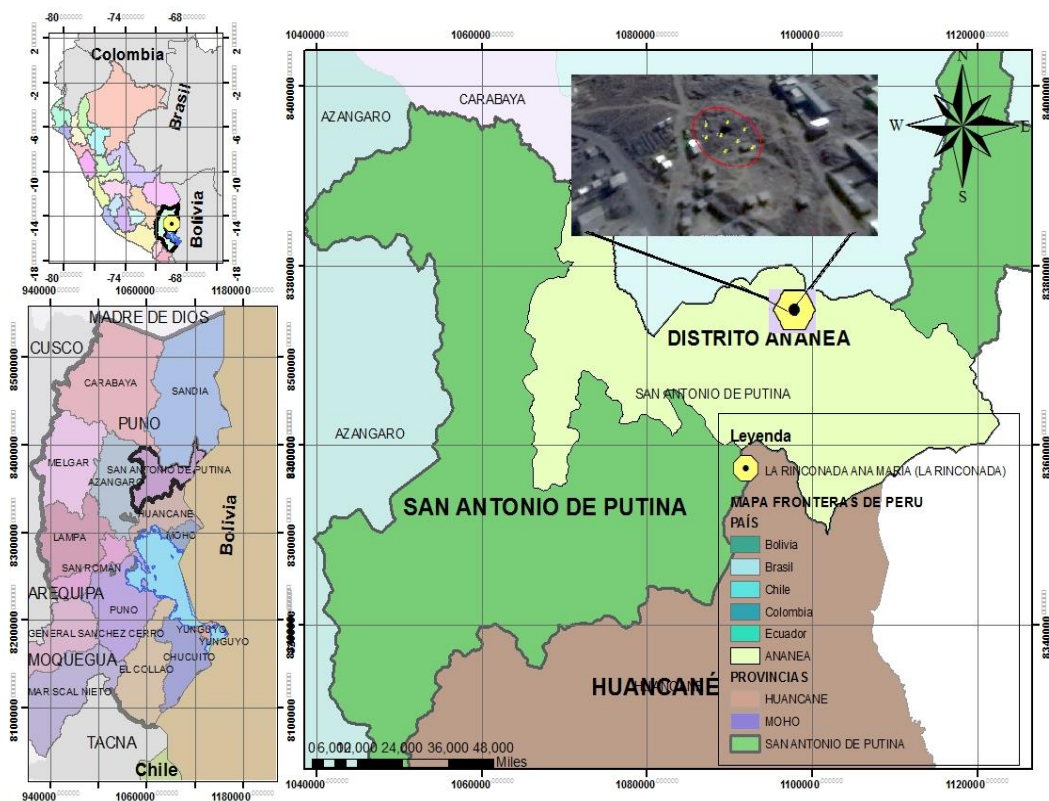


Figura 6. Imagen satelital de la zona y puntos de muestreo.

Fuente: Google Earth 2018.

Coordenadas UTM, WGS84

Tabla 10

Puntos de muestreo – coordenadas.

Puntos de muestreo	Este	Norte	Altura (msnm)
1	451675	8382020	4967
2	451664	8382016	4953
3	451657	8382021	4961
4	451663	8382033	4964
5	451687	8382004	4966
6	451676	8382000	4960
7	451668	8381998	4965
8	451679	8381992	4962

Fuente: Elaboración Propia (2018).

3.6.5. Toma y manejo de la muestra

Para ello la toma de muestra se realizó con una profundidad de 60 cm como lo establece la guía para muestreo de suelos, también se consideró el tipo de recipiente a fin de asegurar la integridad de las muestras hasta su análisis. En cuanto al manejo de la muestra se preservó con una temperatura de 4°C, por último, se realizó el levantamiento de información en campo que incluye la técnica de muestreo, etiquetado, fecha y hora, coordenadas entre otros como lo establece la guía para muestreo de suelos del Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM.

3.6.6. Análisis físicos-químicos

Tabla 11

Determinación de mercurio.

Metodología: Absorción atómica de vapor frío EPA 7471-B		
Materiales	Equipos	Reactivos
– Vaso precipitado – Probeta – Piseta – Agitador manual – Agua desliada	– Espectrofotómetro de absorción atómica – Lámpara de cátodo hueca de mercurio o lámpara de descarga sin electrodos – Dispositivo de grabación: grabador de velocidad – Caudalímetro: Capaz de medir un flujo de aire de 1L/min – Tubo aireación	– Agua de reactivo: el agua de reactivo estará libre de interferencias. – Ácido sulfúrico – Permanganato de potasio, libre de mercurio, solución al 5%

Fuente: USEPA (2000).

3.6.7. Determinación de textura del suelo

Tabla 12

Determinación de textura del suelo.

Metodología: Método de hidrómetro de Bouyoucos		
Materiales	Equipos	Reactivos
– Vaso precipitado 250 ml	– Hidrómetro	– Dispersante
– Probeta 1lt	– Balanza Analítica	(Hexametafosfato de sodio y Carbonato de sodio)
– Piseta	– Reloj	
– Agitador manual	– Agitador de Bouyoucos	
– Agua desliada	– Termómetro	

Fuente: INIA (2017).

Procedimiento

- Pesar 50 gr de muestra de suelo
- Verter la muestra en un vaso precipitado
- Agregar 10 ml dispersante
- Llenar con agua destilada hasta 200 ml
- Reposar 15 minutos
- Trasvasar la muestra en el vaso del agitador Bouyoucos con ayuda de agua destilada
- La muestra deberá permanecer en el agitador de Bouyoucos por un periodo de 1 minuto
- Sacar la muestra y trasvasar a un problema de 1000 ml y agregar agua destilada hasta 1000 ml.
- Agitar manualmente las muestras en periodo de 30 segundos
- Lectura de densidad con el hidrómetro y temperatura con el termómetro en un periodo de (25seg. lectura 5 seg.)

- Segunda medición después de 2 horas.

3.6.8. Determinación densidad aparente

Tabla 13

Determinación densidad aparente.

Metodología: Probeta		
Materiales	Equipos	Reactivos
– Probeta de 100 ml – Vaso de plástico – Franela – Piseta – Embudo	– Balanza Analítica	– Agua destilada

Fuente: INIA (2017).

Procedimiento

- Pesar 100 gr de muestra de suelo
- Verter la muestra en vaso de plástico
- Alistar probetas de 100 ml
- Verter la muestra suelo en la probeta con la ayuda de un embudo
- Luego con la ayuda de una franela tapar la boca de la probeta
- Enseguida sacudir la probeta con la base 25 veces a fin que el suelo este compactado
- Después anotar el volumen del suelo y dividirlo con el peso de la muestra que se pesó al inicio.

3.6.9. Determinación de pH

Tabla 14

Determinación de pH.

Metodología: Potenciómetro (pH-metro)		
Materiales	Equipos	Reactivos
– Envases de pH – Piseta	– pH-metro	– Agua destilada

Fuente: INIA (2017).

Procedimiento.

- Pesar 10 gr de muestra de suelo
- Verter la muestra de suelo en envases de pH
- Agregar 25 ml de agua destilada, dejar reposar por un periodo de 5 minutos, moviendo suavemente.
- Muestra lista para llevar al pH-metro
- Luego lavar con agua destilada el electrodo por cada muestra que se deberá analizar y secar con papel filtro
- Introducir el electrodo en la muestra y esperar resultados
- Anotar y enjuagar con agua destilada a fin de tener limpio de electrodo para la siguiente medición.

Tabla 15

Determinación de conductividad eléctrica.

Metodología: Conductímetro		
Materiales	Equipos	Reactivos
– Envases de pH – Piseta	– Conductímetro	– Agua destilada

Fuente: INIA (2017).

Procedimiento.

- Pesar 10 gr de muestra de suelo
- Verter la muestra de suelo en envases de conductímetro
- Agregar 25 ml de agua destilada, dejar reposar por un periodo de 5 minutos, moviendo suavemente.
- Muestra lista para llevar al conductímetro
- Lavar con agua destilada y secar con papel el electrodo del conductímetro
- Analizar la muestra, anotar resultados teniendo en cuenta el facto de conversión y anotar los resultados junto con la temperatura.
- Enjuagar el electrodo con agua destilada a fin de tener limpio de electrodo para la siguiente medición.

3.6.10. Determinación de humedad del suelo

Tabla 16

Determinación de humedad del suelo.

Metodología: Secado		
Materiales	Equipos	Reactivos
– Taras	– Balanza	-----
– Cinta de embalaje	Analítica	
	– Estufa a 105 °C	

Fuente: INIA (2017).

Procedimiento

- Pesado de las taras para muestreo
- Muestreo colocar la tara boca abajo luego hacer presión en ella a fin de tener un buen muestreo
- Luego sellar la muestra con cinta embalaje a fin asegurar la muestra
- Pesado de la muestra húmeda
- Llevar todas las muestras a la estufa a una temperatura de 105°C durante 24 horas
- Una vez transcurrido el tiempo indicado se iniciará a pesado de la muestra seca y anotar resultados.

Ecuación para determinar el porcentaje de humedad.

$$W = \frac{(W_1 - W_3) - (W_2 - W_3)}{(W_1 - W_3)} \times 100$$

W = Contenido de humedad. (%)

W_1 = Peso húmedo

W_2 = Peso seco

W_3 = Peso de tara

3.7. Procedimiento del experimento

Para el establecimiento del presente trabajo se implementó 20 macetas de polietileno con una capacidad de 4kg cada una, a dichas macetas se les colocó en la base un plato de polietileno, para evitar la lixiviación del mercurio, se aplicó de acuerdo al diseño experimental, 500g de lombricompost, 500g estiércol de bovino y 500g estiércol de oveja, el trasplante del garbancillo se realizó depositando 3 plántulas de 8 hojas de similar altura y grosor de tallo y raíz según la distribución de los tratamientos.

3.8. Descripción de los tratamientos

El experimento consistió de 4 tratamientos (T1, T2, T3, T4,) el (T1) fue muestra testigo o grupo control, cada uno de ellos constó de 5 repeticiones, haciendo un total de 20 unidades experimentales (maceteros) evaluándose después de la fase experimental.

Tabla 17

Distribución de los tratamientos.

Tratamientos	Aplicaciones
T1	Testigo/control. 3kg de suelo contaminado con Hg más 3 plántulas de garbancillo
T2	3kg de suelo contaminado con Hg más 500g de Lombricompost más 3 plántulas de garbancillo
T3	3kg de suelo contaminado con Hg más 500g de estiércol de bovino más 3 plántulas de garbancillo
T4	3kg de suelo contaminado con Hg más 500g de estiércol de oveja más 3 plántulas de garbancillo

Fuente: Adaptado de Sierra (2006).

El primer tratamiento (T1) corresponde al grupo control y consiste en la aplicación del suelo contaminado además de incluir 3 plántulas de garbancillo de similares características, el segundo (T2) consiste en la incorporación del suelo contaminado, lombricompost y especie vegetal garbancillo, el tercero (T3) incluye suelo contaminado, estiércol de bovino y especie vegetal garbancillo, el cuarto tratamiento (T4) incluye suelo contaminado, estiércol de oveja y especie vegetal garbancillo.

Tabla 18

Repeticiones de cada tratamiento.

Repeticiones	Tratamientos			
	T1	T2	T3	T4
	(Grupo Control)			
	Sc+3plantulas	Sc+3plantulas+LC	Sc+3plantulas+EB	Sc+3plantulas+EO
1	1	1	1	1
2	1	1	1	1
3	1	1	1	1
4	1	1	1	1
5	1	1	1	1

Fuente: Elaboración propia (2018).

Sc= Suelo contaminado, LC= Lombricompost. EB= Estiércol de bovino, EO= Estiércol de oveja.

3.9. Análisis estadístico

El presente proyecto de investigación se aplicó el Análisis de varianza (ANOVA) con diseño completamente aleatorio (DCA) con finalidad de comprobar las diferencias significativas de las medias de los tratamientos, todos los análisis fueron realizados a un nivel de confianza del 95 %, siendo el nivel de significancia del 5%. Para ello se utilizó el programa de Software SPSS versión 25.0.

Modelo estadístico asociado al diseño

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + E_{ij}$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, t$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, n$$

Donde:

Y_{ij} = Variable respuesta en la j-ésima repetición del i-ésimo tratamiento

μ = Media general

τ_i = Efecto del tratamiento i

E_{ij} = Es el error experimental de la unidad ij.

3.10. Variables de la investigación

3.10.1. Variable independiente

Garbancillo. (*Astragalus arequipensis*)

3.10.2. Variable dependiente

Remoción de mercurio del suelo contaminado.

3.11. Parámetros de las variables

Tabla 19

Parámetros de las variables.

Variable	Indicadores	Unidad de medida	Metodología
VD. Remoción de mercurio del suelo contaminado	Textura		Método de hidrómetro de Bouyoucos
	pH	pH	Potenciómetro (pH-metro)
	CE	$\mu\text{S}/\text{cm}$	Conductímetro
	DA	g/cm	Probeta
	MO	%	Walkley-Black
	CIC	$\text{me}/100\text{g}$	Young
	P	Ppm	Olsen
	K	Ppm	Acetato de amonio
	N	%	Kjeldahl
	Humedad	%	Secado
	Mercurio (Hg)	Ppm	Espectrometría de absorción atómica

Fuente: Laboratorio de agua y suelo INIA y laboratorio de metales pesados RHLab

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis de supuestos

Para el análisis de datos, fue importante saber si los datos seguían una distribución normal, por lo tanto, se basó en la prueba de Shapiro-Wilk debido a que este es para muestras menores a 30 y nos indica que el valor de significancia debe ser mayor al 5%. (Herrera & Fontalvo, 2011). Esta prueba se realizó a fin de conocer si las variables de investigación tienen una distribución normal, por otro lado, también se realizó la prueba de homogeneidad de varianza de Levene con la finalidad de ver la variabilidad de los diferentes tratamientos de un factor, es decir, entre diferentes grupos con un nivel de significancia de (0.05). (ver tabla 20 y 21).

Los supuestos del modelo son:

a. Prueba de Normalidad de Shapiro-Wilk se contrasta las hipótesis:

H_0 = La muestra tiene una distribución normal

H_i = La muestra no tiene una distribución normal

Tabla 20

Prueba de normalidad.

		Prueba de normalidad Shapiro-Wilk		
Tratamientos		Estadístico	Gl	Sig.
Hg	T1	0.866	5	.252
	T2	0.980	5	.936
	T3	0.850	5	.195
	T4	0.976	5	.911

Fuente: Elaboración propia (2018).

Se muestra en la tabla 20 la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk podemos determinar para el mercurio en los diferentes tratamientos con un P-valor superior al nivel de significancia de 0.05 y decimos que los datos provienen de una distribución normal en todos los tratamientos respectivamente, motivo por el cual se optó utilizar estadística paramétrica.

b. prueba de homogeneidad de varianza de Levene se contrasta las hipótesis:

H_0 = La varianza es igual entre los grupos

H_i = La varianza no es igual entre los grupos

Tabla 21

Prueba de homogeneidad de varianza.

Variable dependiente	Prueba de homogeneidad de la varianza			
	Levene	gl1	gl2	Sig.
Hg (ppm)	2.060	3	16	.146

Fuente: Elaboración propia (2018).

Como se muestra en la tabla 21 la prueba de homogeneidad de varianza para el mercurio, muestra un P-valor superior al nivel de significancia de 0.05, entonces aceptamos la hipótesis nula y decimos que la varianza es igual entre los demás grupos.

4.2 Concentración final de Hg en el suelo.

Hipótesis estadísticas

H_0 = No existe diferencia significativa en remoción de mercurio

H_1 = Existe diferencia significativa en remoción de mercurio

Nivel de significancia

$\alpha = 5\% = 0.05$

En la tabla 22, se presenta los resultados de análisis de contenido final de Hg, se muestra la prueba de significancia de P-valor de 0.000 siendo menor a ($p < 0.05$); por lo tanto, rechazamos la hipótesis nula y decimos que, si existe diferencia significativa entre los tratamientos; así mismo, esto nos indica que las enmiendas aplicadas en los tratamientos si influyen en la remoción del mercurio. Por otro lado, el coeficiente de variación (CV) igual al 0.023% esto nos indica que existe una relación entre el tamaño de la media y variabilidad de la variable (Vásquez, 1990).

Tabla 22

Análisis de varianza paramétrica de concentración final de mercurio.

Fuente de Variación	SC	GL	MC	F cal	F tab	P
TRATAMIENTOS	447.633	3	149.21	182.89	3.239	0,000
Error de muestreo, E	13.054	16	0.82			
Total, T	460.686	19				

Fuente: Elaboración propia (2018). CV=0.023%

De acuerdo al análisis de varianza donde se muestra un p valor significativo donde indica que si hay diferencia de remoción de Hg en los tratamientos. Por lo tanto, se optó por la prueba de Duncan ($p \leq 0.05$) para el mercurio final donde me permite hacer comparaciones múltiples de acuerdo a las medias de cada tratamiento (Tabla 23), muestra comparaciones múltiples de los tratamientos, donde el contenido de mercurio removida de 4 080 ppm, en los diferentes tratamientos son: T2 de 97.55 ppm siendo el mejor tratamiento en la remoción de Hg, seguido por el tratamiento T4 y T1 con concentraciones de 87,47 ppm y 87,47 ppm de Hg, donde obtuvo el mismo efecto removida de Hg, y por último en tratamiento T3 fue la que obtuvo menor concentración removida con un valor de 85.45 ppm de Hg.

Tabla 23

Prueba de Duncan ($p \leq 0.05$) de concentración de mercurio final.

Prueba	TRAT.	Hg inicial	Medias	Remoción (ppm)	Subconjunto
Duncan	T2	4080,01	3982,55	97,55	3982,55
	T4	4080,01	3992,63	87,47	3992,63
	T1	4080,01	3992,63	87,47	3992,63
	T3	4080,01	3994,65	85,45	3994,65

Fuente: Elaboración propia (2018).

Así mismo, se observa en la figura 7, las medias de los tratamientos del mercurio lo cual fueron comparados a través de un análisis de varianza, después de los 62 días del experimento, el valor de inicial de 4080.01 ppm de mercurio disminuyó a 3982.55 ppm en el T2, siendo el mejor tratamiento. Mosquera (2010) menciona que el lombricompost posee un alto contenido de microorganismos, por esta razón lo hace superior a cualquier otro tipo de fertilizante orgánico conocido; por otro lado, Tognetti, Mazzarino, & Hernandez (2005) señalan que la incorporación de lombricompost al suelo contaminado, esta produce un rendimiento significativo a demás favorece al incremento del pH en el suelo. Al respecto Laich (2011) indica que, al agregar

lombricompost al suelo provoca diversos efectos positivos como el aporte de nutrientes necesarios para el buen desarrollo de la planta; de igual manera, García & Solano (2005) mencionan que, el lombricompost es un fertilizante orgánico de buena calidad, cuya característica fundamental es la bioestabilidad, de igual forma, Henriques et al., (2013) establecen que el uso de enmiendas en especial orgánicas favorece a la movilidad del Hg hacia la planta.

El garbancillo (*Astragalus arequipensis*) obtuvo una eficiencia de 97.55 ppm de remoción en un periodo de 2 meses; por otro lado, Durango (2009) donde evaluó la capacidad fitorremediadora de la especie Guarumo en la remoción de mercurio, los resultados mostraron un remoción de 11.53 ppm.

Perdomo, Negrete, & Hernández (2017) en su investigación evaluó las especies *Basella alba* y *Brassica oleracea* cultivadas en suelos contaminados con mercurio, con la aplicación de enmiendas, luego de 2 meses de tratamiento, obtuvo resultados de $380,65 \pm 69,95$ µg/Kg para *Basella alba* y $304,40 \pm 192,61$ µg/Kg para *Brassica aleracea*

los resultados obtenidos confirman que existe una capacidad de remoción apreciable, la remoción más alto fue del tratamiento 2 con 97.55 ppm Mireya (2016) en su investigación evaluó el potencial fitorremediadora de 3 tipos de especies de plantas para remover mercurio; para ello, utilizó Guarumo, Alfalfa y Mani Forrajero, los resultados mostraron una remoción de 60 ppm, 75 ppm, Guarumo y Mani forrajero respectivamente, y la alfalfa mostró mortalidad de todas sus plantas.

Por lo tanto, la fitorremediación es un proceso que utiliza plantas para remover, transferís, estabilizar, destruir cualquier tipo de contaminante orgánicos e inorgánicos y puede aplicarse

tanto in situ como ex situ. Gonzales, Aponte, Bustamante, & Chomba (n.d.) en su investigación evaluó el potencial fitorremediadora en un suelo contaminado con dos niveles de cobre, después de 2 meses de tratamiento, obtuvo resultados de 143 ppm y 124 ppm de remoción respectivamente.

Como se aprecia en los resultados finales del suelo, donde si presento una remoción de mercurio, pero no fueron suficientes para fitorremediar el suelo en su gran mayoría, esto debido al poco tiempo de tratamiento. Jara (2014) menciona que se obtiene mejores resultados cuando el tratamiento es realizado in situ, ya que se puede remover con más eficiencia.

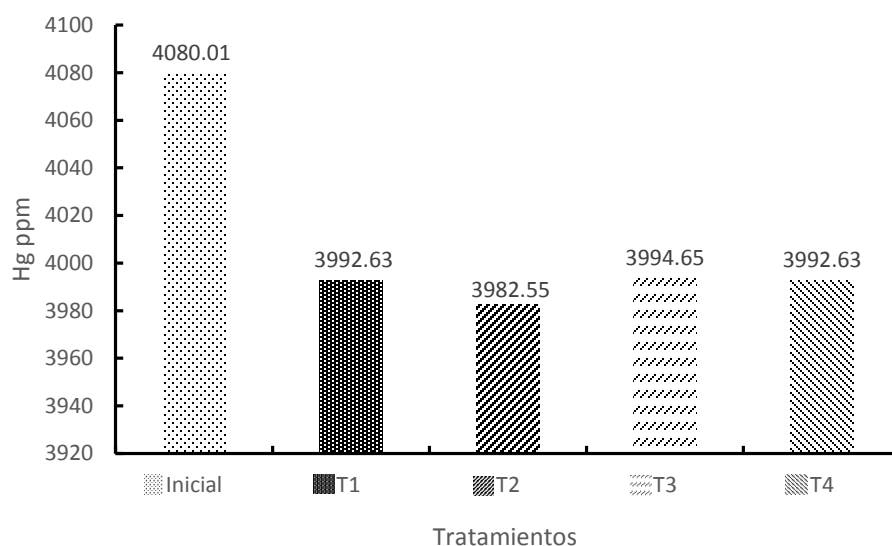


Figura 7. Análisis del Hg después del tratamiento.

Fuente: Elaboración propia (2018).

4.3 Concentración final de pH en el suelo.

En la figura 24. Se ilustran las medias de pH después del tratamiento. De acuerdo con Adriano (1986) indica que el pH es uno de los factores más importantes, afecta a la estabilidad del mercurio en el suelo; de tal forma, el Hg está disponible en un pH ácido y a medida que va aumentando el pH las formas predominantes son los hidróxidos elevándose de este modo las

pérdidas del mercurio por volatilización. De esta manera el tratamiento T3 se observó una concentración de pH con 6.30, siendo un suelo ligeramente ácido, seguido por los tratamientos T4 y T2, con 6.04 y 5.95 de pH, y el T1 es donde no hubo un cambio significativo con la concentración inicial dando un pH de 5.64; por lo tanto, nos indica que es un suelo medianamente ácido y de acuerdo con Adriano (1986) este suelo presenta moderada movilidad del mercurio. También la variación pH se debe a uso de las diferentes enmiendas orgánicas utilizadas. Según Galan & Romeo (2008) indican que la mayoría de los metales tienden a estar disponibles a pH ácido porque son menos fuertemente absorbidos, excepto el Hg que es más móvil a pH alcalino; por otra parte, Chaney et al., (1997) mencionan que, a mayor acidez de los suelos, la absorción y remoción de metales pesados por medio de la fitorremediación es más elevada. Por lo tanto, la transferencia del mercurio a la plata dependerá de las propiedades del suelo como el pH el cual influye en la biodisponibilidad del metal en la solución del suelo (Cogua, Campos, & Duque, 2012).

Tabla 24

Caracterización para el efecto sobre la reacción del suelo pH.

Variable D.	Tratamientos	pH inicial	pH final
pH	T1	5,59	5,64
pH	T2	5,59	5,95
pH	T3	5,59	6,30
pH	T4	5,59	6,04

Fuente: Elaboración propia (2018).

4.4 Concentración final de CE en el suelo.

En la tabla 25 se presenta los resultados de análisis de contenido final de CE por lo que se observa, que el tratamiento T4, es el que tiene mayor conductividad eléctrica, siendo 0.15 mmhos/cm, por lo tanto, significa que es un suelo muy ligeramente salino. Asimismo, la

conductividad final de suelo no vario mucho, pues los resultados de los demás tratamientos oscilan entre 0.12 a 0.13 mmhos/cm, lo que indica que el suelo es muy ligeramente alcalino. Así mismo, Hazelton & Murphy (2007) mencionan que la CE es la capacidad de los iones de la solución suelo conducir la electricidad iones en solución son los que están disponibles o son asimilables para las plantas. Por lo tanto, la conductividad eléctrica se mostró un descenso significativo en las muestras, con un valor promedio de 1.64 mmhos/cm y 0.13 mmhos/cm en muestra inicial y final, respectivamente.

Tabla 25

Caracterización de la conductividad eléctrica del suelo.

Variable D.	TRATAMIENTOS	CE inicial	CE final
CE (mmhos/cm)	T1	1,64	0,12
CE (mmhos/cm)	T2	1,64	0,12
CE (mmhos/cm)	T3	1,64	0,13
CE (mmhos/cm)	T4	1,64	0,15

Fuente: Elaboración propia (2018).

4.5 Concentración final de fósforo en el suelo

En la tabla 26 se presenta los resultados de análisis de fósforo donde se muestra que el tratamiento T2 tuvo mayor fósforo disponible en el suelo con 6.95 ppm, seguido por los tratamientos T1 y T3 con 6.43 y 6.10 ppm de fósforo disponible respectivamente y por último el tratamiento T4 un valor mínimo de 5.51 ppm de fósforo, estos 4 tratamientos no son similares esto significa que hay diferencia entre los tratamientos. Por otro lado, Sánchez (2003) menciona que lombricomposta con tiene fósforo de 2 a 8 % a comparación de las demás enmiendas utilizadas. Por lo tanto, esto nos da a entender que la enmienda aplicada en el tratamiento 2 influye en el fósforo disponible en el suelo.

Tabla 26

Caracterización de la concentración final de fósforo.

Variable D.	TRATAMIENTOS	P inicial	P final
P (ppm)	T1	6,48	6,43
P (ppm)	T2	6,48	6,95
P (ppm)	T3	6,48	6,10
P (ppm)	T4	6,48	5,51

Fuente: Elaboración propia (2018).

4.6 Concentración final de potasio en el suelo

En la tabla 27 se presenta los resultados de análisis de potasio final donde se muestra valores que los tratamientos T1 y T4 muestran una diferencia significativa alta con un resultado de 1495.49 ppm y 9344.42 ppm, seguido de los tratamientos T3 y T2 con 2091.74 ppm y 2697.78 ppm de (K) respectivamente. Por otro lado, Mamani (1996) da mención respecto al contenido de potasio del estiércol de oveja está en un porcentaje de 1.28 %.

Tabla 27

Caracterización para el potasio disponible después del tratamiento.

Variable D.	TRATAMIENTOS	K inicial	K final
K (ppm)	T1	1837,60	1495,49
K (ppm)	T2	1837,60	2697,78
K (ppm)	T3	1837,60	2091,74
K (ppm)	T4	1837,60	9344,42

Fuente: Elaboración propia (2018).

4.7 Concentración final de nitrógeno total en el suelo

En la tabla 28 se muestra el análisis para el porcentaje de nitrógeno final en el suelo, donde los resultados en cada tratamiento no presentan una diferencia significativa entre los tratamientos respectivamente. Por lo que indica que las enmiendas orgánicas utilizadas en los tratamientos no tuvieron variabilidad en el resultado de nitrógeno total.

Tabla 28

Caracterización para porcentaje de nitrógeno total después de tratamiento.

Variable D.	TRATAMIENTOS	N inicial	N final
N (%)	T1	0,03	0,06
N (%)	T2	0,03	0,06
N (%)	T3	0,03	0,06
N (%)	T4	0,03	0,06

Fuente: Elaboración propia (2018).

4.8 Determinación de la textura del suelo después del tratamiento.

En la figura 8, muestra los resultados que se obtuvieron después del tratamiento, se puede observar que, la textura del suelo no obtuvo una mejora considerable, es decir que la aplicación de las enmiendas orgánicas durante el tratamiento no presentó efecto en la textura del suelo siendo un suelo Franco areno antes y después del tratamiento. Así mismo, Sierra (2006) menciona que la textura determina la disponibilidad de los metales pesados en el suelo, la cual condiciona la infiltración en el suelo. De acuerdo con Alloway, (1995) indica que la textura juega un papel importante en la infiltración o pérdida de los metales pesados en el suelo. La zona de estudio presenta clases texturales de franco arenoso, lo cuales por sus características el Hg puede infiltrarse hasta contaminar el nivel freático.

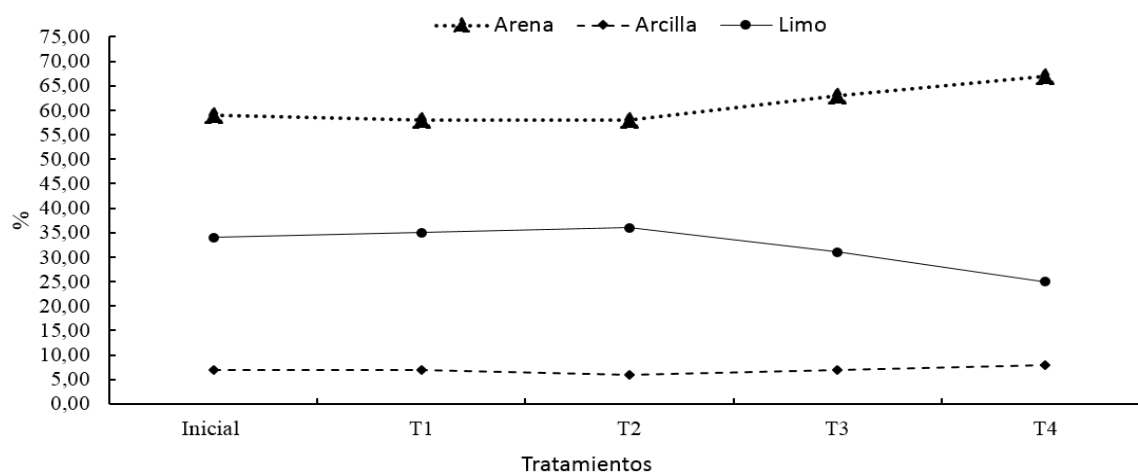


Figura 8. Determinación de la textura del suelo final

Fuente: Elaboración propia (2018).

4.9 Concentración final de la densidad aparente del suelo

En la tabla 29 se presenta los resultados de la densidad aparente final del suelo, donde se muestra los tratamientos T4 y T1 presentan una diferencia con un valor de 1.01 g/cm³ y 1.22 g/cm³, seguido por los tratamientos T3, T2 con 1.03 g/cm³ y 1.06 g/cm³ de DA respectivamente, por tanto, nos indica que no hay mucha variación. Por otro lado, Hazelton & Murphy (2007) mencionan que la densidad aparente es un parámetro dependiente de la textura del suelo, es decir a mayor densidad, las raíces de las plantas tendrán mayor dificultad para poder penetrar los poros del suelo. Por ello la clasificación constituye una escala desde abierto (menor a 1.4 g/cm³), satisfactorio (1.4 a 1.16 g/cm³) a muy compacto (mayor a 1.6 g/cm³) para suelos arenosos.

Tabla 29

Caracterización para la densidad aparente del suelo.

Variable D.	TRATAMIENTOS	DA inicial	DA final
DA (g/cm ³)	T1	1,44	1,22
DA (g/cm ³)	T2	1,44	1,06
DA (g/cm ³)	T3	1,44	1,03
DA (g/cm ³)	T4	1,44	1,01

Fuente: Elaboración propia (2018).

4.10 Determinación de la capacidad de intercambio catiónico del suelo

Los resultados para la capacidad de intercambio catiónico después del tratamiento (tabla 30) se muestra que el tratamiento T4 tuvo mayor capacidad de intercambio en el suelo con 9.03 me/100g, seguido por los tratamientos T1 y T2 con 8.56 y 8.24 me/100g de CIC respectivamente y por último el tratamiento T3 un valor mínimo de 7.57 me/100g de CIC, es importante que la CIC está directamente afectada por el pH del suelo y el contenido de materia orgánica, una CIC por encima de 10 miliequivalentes por 100 gramos de suelo (10 meq/100g) es considerado

adecuado. Por tanto, esto nos da a entender que las enmiendas aplicadas en el tratamiento si influyen en la capacidad de intercambio catiónico del suelo.

Tabla 30

Caracterización de la capacidad de intercambio catiónico del suelo después del tratamiento.

Variable D.	TRATAMIENTOS	CIC inicial	CIC final
CIC (me/100g)	T1	5,00	8,56
CIC (me/100g)	T2	5,00	8,24
CIC (me/100g)	T3	5,00	7,57
CIC (me/100g)	T4	5,00	9,03

Fuente: Elaboración propia (2018).

4.11 Concentración final del porcentaje de materia orgánica total.

En la tabla 31 se presenta los resultados de análisis de contenido final de materia orgánica, , el T1 según la escala del INIA (2017) señala que tiene un valor bajo de materia orgánica, mientras que en los tratamientos T3, T4 y T2 muestran contenidos de materia orgánica inferior al T1. De acuerdo con Rytuba (2000) indica que el Hg puede ser fijado principalmente por la materia orgánica, donde se genera metilmercurio, el estado en el cual el mercurio es más contaminante para el ambiente; asimismo, Andersson (1979) indica que, esta fuerte afinidad del mercurio con la materia orgánica se incrementarse con la acidez del suelo ($\text{pH} < 4$). Por otro lado, Cogua et al., (2012) señalan que la transferencia del mercurio a la planta dependerá de la materia orgánica presente en el suelo puesto que esta favorece a su movilidad formando especies orgánicas de mercurio.

Tabla 31

Caracterización de materia orgánica después del tratamiento.

Variable D.	TRATAMIENTOS	MO inicial	MO final
MAT ORG (%)	T1	1,10	1,54
MAT ORG (%)	T2	1,10	1,41
MAT ORG (%)	T3	1,10	1,49
MAT ORG (%)	T4	1,10	1,49

Fuente: Elaboración propia (2018).

4.12 Concentración para porcentaje de humedad después del tratamiento

En la tabla 32 se presenta los resultados del análisis de contenido de humedad final se muestra que el tratamiento T4 tuvo mayor porcentaje de humedad con 29.15 %, seguido por el tratamiento T1 y T2 con 27.20 y 26.27 % de humedad en suelo respectivamente, siendo similares, y por último el tratamiento T3 siendo menor a los demás con 19.59 % de humedad. Por ende, el contenido de humedad en los tratamientos influye de forma directamente sobre el desarrollo de la planta, ya que afecta a la disponibilidad de nutrientes.

También se observa que la humedad que presenta el suelo en un estado inicial es diferente, a la humedad que se tiene en el tratamiento, ya que este suelo fue hidratado alcanzando una humedad promedio de 25.54 %. Por otro lado, Mamani (1996) menciona que, una de las principales ventajas que se logra con estiércol es el incremento en la capacidad de retención de humedad.

Tabla 32

Caracterización para porcentaje de humedad total.

Variable D.	TRATAMIENTOS	%H inicial	%H final
HUMEDAD (%)	T1	11,27	27,20
HUMEDAD (%)	T2	11,27	26,27
HUMEDAD (%)	T3	11,27	19,53
HUMEDAD (%)	T4	11,27	29,15

Fuente: Elaboración propia (2018).

4.13 Efecto de la incorporación de las diferentes enmiendas en la variación del crecimiento de *Astragalus arequipensis*.

4.13.1 Altura de planta.

En la tabla 33 se presenta los resultados de análisis de altura de planta se muestra comparaciones de los tratamientos, de tal forma los tratamientos T1 y T2 muestran una diferencia alta con un resultado de 14.35 cm y 19.54 cm, seguido de los tratamientos T3 y T4 con 16.38 cm y 16.27 cm de altura respectivamente. Por lo tanto, esto nos da a entender que las enmiendas aplicadas en el tratamiento si influyen en el crecimiento de la planta.

Tabla 33

Altura de la especie Astragalus arequipensis.

Variable D.	TRATAMIENTOS	Altura
Altura de planta (cm)	T1	14,35
Altura de planta (cm)	T2	19,49
Altura de planta (cm)	T3	16,38
Altura de planta (cm)	T4	16,27

Fuente: Elaboración propia (2018).

En la figura 9 se observa el análisis de las alturas de las plantas donde, T2 mostró un crecimiento de 19.49 cm en T2, desarrollando también mayor de cantidad de biomasa; por otro lado, Buendía, Cruz, Meza, & Arévalo (2014) en su investigación de fitorremediación utilizó la especie *Helianthus Annuus* L, para remover metales pesados, en sus resultados que mostraron para el lombricompost presentó un mejor crecimiento en altura y peso seco de los tejidos de la especie, además acumulo mayor cantidad de metales pesados. De acuerdo con Laich, (2011) indica que, al agregar lombricompost al suelo provoca diversos efectos positivos como el aporte de nutrientes necesarios para el buen desarrollo de la planta. Por lo tanto, las enmiendas aplicadas en los tratamientos si influyen en el crecimiento de la planta.

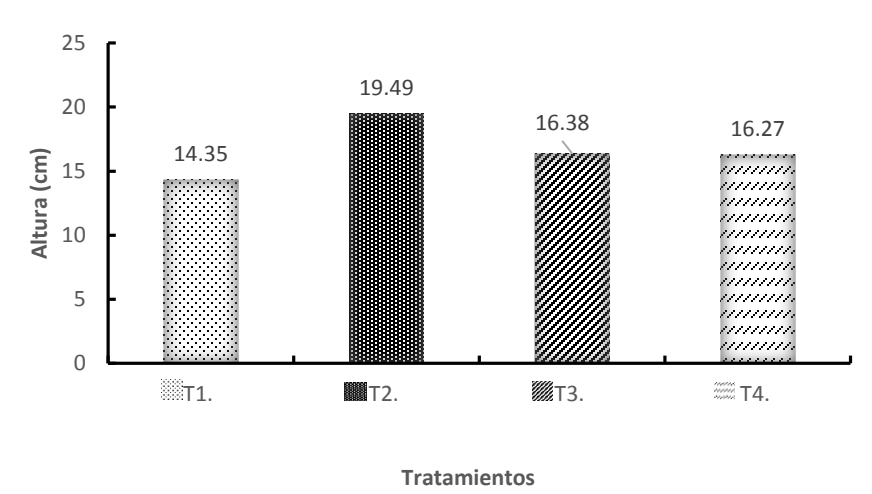


Figura 9. Altura de planta en los tratamientos
Fuente: Elaboración propia (2018).

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

El estudio realizado demostró estadísticamente que la especie *Aragalus arequipensis* (Garbancillo) posee capacidad fitorremediadora, debido a que logra remover mercurio, en todos los tratamientos (T1, T2, T3, T4).

Se demostró que el contenido inicial de 4080.01 ppm de mercurio disminuyó en los diferentes tratamientos: T2 de 3982.55 ppm, T3 de 3994.65 ppm, T1 y T4 con resultados iguales de 3992.63 ppm, siendo el más eficiente el T2 con un 97.55 ppm de remoción de mercurio respectivamente.

Las enmiendas orgánicas utilizadas en los diferentes tratamientos favorecieron a la mejora de las condiciones físicas y biológicas de la estructura del suelo como es la porosidad y almacenamiento del agua, también favoreció al crecimiento de la *Aragalus arequipensis* en los tratamientos T2 y T3 alcanzando una altura de 19.49 cm y 16.38 cm debido la mayor disponibilidad de nutrientes, seguido de los tratamientos T4 y T1 con una altura de 16.27cm y 14.35 cm.

Del mismo modo, las características físico y químicas del suelo fueron favorecidas con la adición de las enmiendas orgánicas, teniendo así mejoras en el pH para el tratamiento T3 que

tuvo mayor concentración de 6.30 siendo un suelo ligeramente ácido, seguido por los tratamientos T4, T2 y T1 del suelo con 6.04, 5.95 y 5.4 de pH en suelo respectivamente.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda realizar la prueba con la especie garbancillo (*Astragalus arequipensis*) con un periodo más prolongado de tiempo, a fin de que se pueda obtener el máximo desarrollo de la especie mencionada.
- Se recomienda para futuras investigaciones determinar el factor de bioconcentración de metal mercurio en la especie vegetal (hoja, raíz y tallo).
- Sería recomendable realizar la prueba con otros metales pesados a fin de determinar si esta planta puede usarse para fitorremediar suelos con contaminados con distintos metales.
- Se recomienda hacer análisis de lixiviados de cada tratamiento a fin de conocer con mayor confiabilidad el balance de masa de concentraciones del mercurio.
- Se recomienda la disposición de las plantas concluida la fitorremediación de suelo contaminado por mercurio, debe depositarse en rellenos acondicionados.

REFERENCIAS

- Adriano, D. C. (1986). *Mercury. Trace elements in the terrestrial environment*. Berlin Heidelberg New York, Springer.
- Alloway, B. (1995). *Heavy metals in soils*. Blackie Academic and Profesional. Londres.
- Andersson, A. (1979). Mercury in soil. *The Biogeochemistry of mercury in the Environment*. Elsevier, Amsterdam, p.p 79-112.
- ATSDR. (2009). *Evaluación de la exposición al mercurio: información para profesionales sanitarios*. Retrieved from www.atsdr.cdc.gov/dro/dro_org.html
- Buendía, H., Cruz, F., Meza, C., & Arévalo, J. (2014). Fitorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos de petróleo, *Ciencias Sociales*. Universidad Agraria La Molina. Perú., 1, 113–121.
- Cabañero O. (2005). *Acumulación-interacción de especies de mercurio y selenio en tejidos animales: desarrollo de nuevas metodologías de análisis*.
- Carbo, B., & Bautinza, C. (2008). *Manual de prácticas de suelo*. Lima: Imprenta Unión Caseres.
- Chaney, R. ., Malik, M., Ym, L., Sl, B., Ep, B., Js, A., & Aj, B. (1997). Título : Phytoremediation of soil metals. *Current Opinion in Biotechnology*, 8(3), 279–284.
- Chien, L. C., Han, B. C., Hsu, C. Sen, Jiang, C. Bin, You, H. J., Shieh, M. J., & Yeh, C. Y. (2006). Analysis of the health risk of exposure to breast milk mercury in infants in Taiwan. *Chemosphere*. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.11.059>
- Cogua, P., Campos, H., & Duque, G. (2012). Concentración de mercurio total y metilmercurio en sedimento y seston de la bahía de catagena, caribe colombiano, 41(1107), 267–285.

- Delgado, R., & Casanova, E. (2005). El rol del suelo en el desarrollo de la agricultura sustentable : la necesidad de integración de procesos del sistema Suelo-Cultivo-Hombre-Ambiente. Facultad de Agronomía, Instituto de edagología., (June).
- Durango, J. (2009). *Capacidad del Guarumo (Cecropia Peltata) Como Planta Fitorremediadora de Suelos Contaminados con Mercurio*. Universidad de Cartagena, Sistema de Universidades Estatales del Caribe Colombiano Sue-Caribe, Ciencias Ambientales. Cartagena, Colombia.
- Espinoza, J. (1991). *Intoxicación por plantas venenosas que afectan a la ganadería peruana* (Vol. 5). Lima. Retrieved from <http://opackoha.iica.int/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=11477>
- Evans, M. S., Muir, D., Lockhart, W. L., Stern, G., Ryan, M., & Roach, P. (2005). Persistent organic pollutants and metals in the freshwater biota of the Canadian Subarctic and Arctic: An overview. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.01.052>
- FAO. (2014). Atlas de suelo de América Latina y El Caribe, 2014.
- FAO. (2016). Portal de suelo de la FAO. disponible en URL: <http://www.fao.org/soilsportal/levantamiento-de-suelos/propiedades-del-suelo/propiedades-quimicas/es/>, 2016.
- Galan, E., & Romeo, B. (2008). Contaminación de suelos por metales pesados, 10, (pág. 13) Sevilla: Revista de la Sociedad Española.
- García, M., & Solano, V. (2005). Cría de la lombriz de tierra una alternativa ecológica y rentable. Universidad de Cundinamarca. Ubaté, Pp.316.

- Gonzales, J., Aponte, M., Bustamante, E., & Chomba, J. (n.d.). Fitorremediación de un suelo contaminado con dos niveles de cobre, mediante el uso del cultivo de la alfalfa “Medicago sativa”. Universidad Católica de Trujillo, 1–10.
- Grandez, M. (2017). *Remoción de cadmio y plomo en suelos a orillas del río Mantaro, Junín, mediante fitorremediación con girasol (Helianthus annuus) y maíz (Zea mays) usando enmiendas*. Universidad César Vallejo, Facultad de Ingeniería, Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental.
- Hazelton, P., & Murphy, B. (2007). *Interpreting Soil Test Results What do all The Numbers Mean? (Sexta edición)*.
- Henriques, B., Rodrigues, S., Coelho, C., Cruz, N., Duarte, A., Römken, P., & Pereira, E. (2013). ks associated with the transfer of toxic organo-metallic mercury from soils into the terrestrial feed chain. *Environment International* 59, 408 – 417, 2013.
- Herrera, R., & Fontalvo, T. (2011). *Seis Sigma Métodos Estadísticos y Sus Aplicaciones*. Retrieved from <https://docplayer.es/4735771-Seis-sigma-metodos-estadisticos-y-sus-aplicaciones-roberto-jose-herrera-acosta-tomas-jose-fontalvo-herrera.html>
- Hinton, J., & Veiga, M. (2001). *Mercury Contaminated Sites: A Review of Remedial Solutions*.
- Huayllani, M. (2016). *Presencia de Metales Pesados en La Estructura Vegetal de Apeiba membranacea Spruce ex Benth. (Peine de mono), Ochroma pyramidale (Cav, ex. Lam.) Urb. (Topa), Ceiba pentandra (L.) Gaerth. (Lupuna), Erythrina ulei Harms (Amasisa) Instaladas en Áreas Interve*. Madre de Dios Capital de la Biodiversidad, Facultad de Ingeniería, Escuela Académico Profesional de Ingeniería Forestal y Medio Ambiente. Puerto Maldonado, Perú.

- Hurtado, R. (2017). Identification of toxic plants for livestock in tucumano-bolivian forest in the west of santa cruz, bolivia. *Nº*, 8, 18–27.
- Iñiguez, M. (2007). *Fertilidad, fertilizantes y fertilización del suelo*. Universidad Nacional de Loja. Retrieved from <https://www.google.com.pe/search?q=Iñiguez%2C+M.+2007.+Fertilidad%2C+fertilizantes+y+fertilización+del+suelo.+Universidad+Nacional+de+Loja.+61+p.&dq=Iñiguez%2C+M.+2007.+Fertilidad%2C+fertilizantes+y+fertilización+del+suelo.+Universidad>
- Instituto Nacional de Innovación Agraria. (2017). *Manual de Procedimientos de dos Análisis de Suelos y Agua con Fines de Riego*. Lima, Perú.
- Jara, P. (2014). Capacidad fitorremediadora de cinco especies altoandinas de suelos contaminados con metales pesados, 21(October), 145–154.
- Khatoonabadi. A, Abadi, A. K., Hoseini, A. R. S., & Khalili, B. (2008). *Effect of mercury on the human health and environment: an overview. International Journal of Food Safety, Nutrition and Public Health*. <https://doi.org/10.1504/IJFSNPH.2008.018854>
- Kidd, P., Barceló, J., Bernal, M. P., Navari-Izzo, F., Poschenrieder, C., Shilev, S., ... Monterroso, C. (2009). Trace element behaviour at the root–soil interface: Implications in phytoremediation. *Environmental and Experimental Botany*, 67(1), 243–259. <https://doi.org/10.1016/J.ENVEXPBOT.2009.06.013>
- Knight, A., & Walter, R. (2001). *A Guide to Plant Poisoning of Animals in North America*. Teton New Media Incorporated, Jackson Wyoming, USA. pp367. *A guide to plant poisoning of animals in North America*. International Veterinary Information Service. Retrieved from <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20023149763>

- Laich, F. (2011). El papel de los microorganismos en el proceso de compostaje, Instituto Canario de Investigaciones Agrarias., 1–7.
- López-Martínez, S., Gallegos-Martínez, M. E., Flores, L. J. P., & Rojas, M. G. (2005). *Mecanismos de fitorremediación de suelos contaminados con moléculas orgánicas xenobióticas. Rev. Int. Contam. Ambient* (Vol. 21).
- Lora Silva, R., & Bonilla Gutiérrez, H. (2010). Remediación de un suelo de la cuenca alta del río Bogotá contaminado con los metales pesados cadmio y cromo. *Revista U.D.C.A Actualidad y Divulgación Científica*, 13(2), 61–70. Retrieved from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-422620100002000008&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- Mamani, C. (1996). *Evaluación de la productividad forrajera de cultivares de avena (Avena sativa L.) asociada con Vicia (Vicia sp). Escuela profesional de Ingeniería Agronómica. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional del Altiplano. Puno, Perú.*
- Martínez, X. (2004). *El mercurio como contaminante global Desarrollo de metodologías para su determinación en suelos contaminados y estrategias para la reducción de su liberación al medio ambiente.* Universidad Autónoma de Barcelona .
- Méndez, P., Ramírez, G., César, A., Gutiérrez, R., Alma, D., & García, P. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(1), 17. <https://doi.org/10.18770/1870-0462>
- MINAM. Guía para el muestreo de suelos D.S N° 002-2013-MINAM (2013). Lima, Perú. <https://doi.org/10.18770/1870-0462>
- MINAM. Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo Decreto Supremo N°

- 011-2017-MINAM (2017). Lima, Perú.
- Ming-Ho. (2005). *Environmental toxicology : biological and health effects of pollutants* (2nd ed.). Boca Raton : CRC Press. Retrieved from <http://lib.ugent.be/catalog/rug01:001256445>
- Mireya, I. (2016). *Evaluación de la medicago sativa l (alfalfa), cecropia peltata l (guarumo) y arachis pintoi w.c (maní forrajero) como potenciales especies fitorremediadoras para remediación de suelos contaminados por minería aurífera en las riveras del río nambija, b arr.* Universidad Nacional de Loja, Área Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables, Carrera de Ingeniería en Manejo y Conservación del Medio Ambiente. Zamora, Ecuador.
- Mosquera, B. (2010). Abonos orgánicos protegen el suelo y garantizan alimentación sana. In *Manual para la elaborar y aplicar abonos y plaguicidas orgánicos* (p. 25). Quito, Ecuador.
- Mosquera, C., Trillo, A., & Lujan, A. (1999). *Propuesta para un Plan de Acción para el Proyecto Gama*. Lima.
- Orroño, D. (2002). *Acumulación de metales (cadmio, zinc, cobre, cromo, níquel y plomo) en especies del género Pelargonium: suministro desde el suelo, ubicación en la planta y toxicidad*. Universidad de Buenos Aires, Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano Facultad de Agronomía. Buenos Aires, Argentina.
- Peer, W. A., Baxter, I. R., Richards, E. L., Freeman, J. L., & Murphy, A. S. (2006). Phytoremediation and hyperaccumulator plants. *Topics in Current Genetics*. https://doi.org/10.1007/4735_100
- Perdomo, W., Negrete, J., & Hernández, J. (2017). El efecto de la aplicación de enmiendas en la transferencia de mercurio (Hg) en Basella alba y Brassica oleracea cultivadas en suelos

- contaminados de la Mojana. Universidad de Córdoba, Colombia., 3, 87–89.
- Pilon-Smits E. (2005). Phytoremediation. *Annual Reviews of Plant Biology*, 15–39.
- PNUMA. (2007). *United Nations Environment Programme INFORME ANUAL DEL PNUMA 2007 Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente*.
- Poulin, J., Gibb, H., & Prüss-Üstün, A. (2008). *Mercury Assessing the environmental burden of disease at national and local levels Public Health and the Environment Geneva 2008*. (Annette Prüss-Üstün, Ed.).
- Prasad, V., & Freitas, O. (2003). *Metal hyperaccumulation in plants-Biodiversity prospecting for phytoremediation technology. Electronic Journal of Biotechnology* (Vol. 6). Retrieved from <http://www.ejbiotechnology.info/content/vol6/issue3/full/6>
- Prieto-García, F., Callejas, J., Ángeles, M., Gaytán, J., & Barrado, E. (2005). Acumulación en Tejidos Vegetales de Arsénico Proveniente de Aguas Y Suelos de Zimapán, Estado de Hidalgo, México, 3(17), 129–135.
- Pulford, I. D., & Watson, C. (2002). Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees - A review. *Environment International*. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(02\)00152-6](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00152-6)
- Rodrigo, D. (2018). *Capacidad fitorremediadora de la especie Helianthus annuus mediante la incorporación de enmiendas a suelos contaminados por metales pesados (Plomo, Cromo) de Industrias Metalmecánicas*. Universidad Peruana Unión, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental. Lima, Perú.
- Roldán, J. (2008). *Como hacer un proyecto de investigación*. España: Universidad de Alicante.

- Sánchez, C. (2003). *Abonos orgánicos y lombricultura*. (C. G. y Negocio, Ed.) (Ediciones). Lima, Perú.
- Sierra, R. (2006). *Fitorremediación de un Suelo Contaminado con Plomo por Actividad Industrial*. Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”, México.
- Sperberg, F., & Hirzel, J. (2016). *Guía de manejo y buenas prácticas de aplicación de enmiendas orgánicas en agricultura*. Chillán.
- Teaf M, C. (2012). Mercury Exposure Considerations: Evaluating the Chemical Form and Activities of the Individual. *Sediments, Water and Energy*, 17.
- Timbrell, J. (2009). *Principles of Biochemical Toxicology* (Fourth Edition). London.
- Tognetti, C., Mazzarino, M. J., & Hernandez, M. T. (2005). Composting vs . Vermicomposting : A Comparison of End Product Quality, 13(1), 6–13.
- USEPA. (2000a). Introduction to Phytoremediation. *United States Environmental Protection Agency*.
- USEPA. (2000b). Mercurio en Residuos Sólidos o Semisólidos (Técnica Manual de Frío-Vapor), Método 7471B. *EPA Methodology*, (November), 1–17.
<https://doi.org/10.1002/9780470132616.indcas>
- Valko, M., Morris, H., & Cronin, M. (2005). Metals, Toxicity and Oxidative Stress. *Current Medicinal Chemistry*. <https://doi.org/10.2174/0929867053764635>
- Volke, T., & Velasco, A. (2002). *Tecnologías de remediación para suelos contaminados*. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/31851896>
- Ward, D. M., Nislow, K. H., & Folt, C. L. (2010). Bioaccumulation syndrome: Identifying

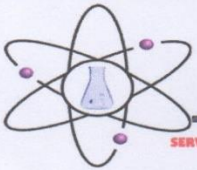
factors that make some stream food webs prone to elevated mercury bioaccumulation. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1–83. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2010.05456.x>

Weinberg, J. (2007). *Introducción a la Contaminación por Mercurio para las ONG*.

Zhou, J., Wang, Z., Zhang, X., & Gao, Y. (2004). Mercury concentrations and pools in four adjacent coniferous and deciduous upland forests in Beijing, China. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. <https://doi.org/10.1002/2017JG003776>

ANEXOS

ANEXO A. Análisis de mercurio inicial del suelo contaminado provenientes de la actividad minera.

**RHLAB S.A.C.**
SERVICIOS ANALÍTICOS QUÍMICO - METALÚRGICO

RH-M21-014

INFORME DE ENSAYO

DATOS DEL CLIENTE	
A SOLICITUD DE	Bach. Jean Ronal Vilcapaza Ccoa
ASUNTO	Determinación Analítica del contenido Metálico Total en la muestra
PROCEDENCIA	Sector Antahuila del Centro Poblado la Rinconada - Puno
CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES DE LA MUESTRA	
DENOMINACIÓN DE LA MUESTRA	Muestra Inicial
CANTIDAD DE MUESTRAS	01
UBICACIÓN	Coordenadas 19L0451675 8382020
SOLICITUD DE ENSAYO	Análisis Químico elemento Mercurio (Hg). Por Reconocimiento
MOTIVO	Evaluación de la capacidad fitorremediadora del garbancillo (<i>Astragalus arequipensis</i>) en función de tres tipos de enmiendas orgánicas sobre la remoción de mercurio del suelo contaminado por la actividad minera del Centro Poblado la Rinconada - Región Puno, 2018
RECEPCION DE MUESTRAS	Bolsas de Plastico hermeticos, debidamente conservado
FECHA DE REALIZACION DEL ENSAYO	06/09/2018 al 08/09/2018
DETALLE DEL INFORME	

RESULTADO DE ENSAYO

N°	N° RH	Código de Cliente	Hg
			ppm
1	RH200137	Muestra Inicial	4080.01

Los resultados obtenidos y que se consignan en el presente informe corresponden al ensayo solicitado en las muestras recibidas del cliente.

METODOS DE REFERENCIA

* Determinación de Mercurio (Hg) en muestra sólida - Método Espectrofotometría de Absorción Atómica


Piedad Huaynapata Luque
CIP 187755
GERENTE DE OPERACIONES

Av Martires del 4 de Noviembre N° 2414 (Salida Puno - Frente a Covisur)
Cel: 978645480 - 935008140

ANEXO B. Análisis de caracterización del suelo contaminado proveniente de la actividad minera.



MINISTERIO DE AGRICULTURA
INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACIÓN AGRARIA-INIA
SERVICIO NACIONAL DE LABORATORIOS
ESTACIÓN EXPERIMENTAL ILLPA - PUNO
Of. Principal: Av. La Molina 1981 - La Molina Lima



ANÁLISIS DE CARACTERIZACIÓN

Nombre: Jean Ronald Vilcapaza Ccoa.

Procedencia: Puno Prov. San Antonio de Putina, Centro Poblado la Rinconada.

Fecha de Recepción: 10 de Septiembre del 2018.

Fecha de Certificación: 17 de Septiembre del 2018.

Caracterización de propiedades relativamente permanente del suelo.

Nº	Cod. Lab.	MARCAS	ANÁLISIS MECÁNICO				CO ₂ Ca %	Yeso me/100g	Mat. Org. %	N. TOTAL %
			Arena	Arcilla	Limo	Textura				
			%	%	%					
1	309A2	Sector Antahuila MR	59	7	34	FA	0,00		1,10	0,03
2										
3										
4										

Caracterización del Estado de fertilidad y condiciones alterables del suelo.

Nº	Suelo: Agua 1:2.5		NUTRIENTES DISPONIBLES				Boro Soluble	CATIONES CAMBIABLES					CIC	Suma Cationes
	pH	C.E. mmhos/cm	P	K	Mn	Zn		Al	Ca	Mg	Na	K		
			(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)		me/100g	me/100g	me/100g	me/100g	me/100g	me/100g	
1	5,59	1,64	6,48	1837,60				T	2,00	1,30	0,2	0,70	5,00	4,20
2														
3														
4														

Referencias:

Methods of analysis for soils, plants and waters. University of California, Division of Agricultural Sciences E.U.A. Sexta reimpresión, Octubre 1988. 195p.

Conclusiones:

La muestra analizada de SUELO CUMPLE con los requisitos de documentos referenciales. (El informe sólo afecta a la muestra sometida a ensayo).

Nota:

Cualquier corrección y/o enmendadura anula al presente documento.



INIA
ESTACIÓN EXPERIMENTAL ILLPA - PUNO

Ing° JORGE CANAHUA ROJAS
Jefe Laboratorio Análisis
SALCEDO

Los resultados son aplicables a estas muestras.

www.inia.gob.pe

Rinconada de Salcedo s/n
Puno, Puno, Perú
T: (051) 363-812

ANEXO C. Análisis de porcentaje de humedad del suelo contaminado proveniente de la actividad minera.



MINISTERIO DE AGRICULTURA
INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACION AGRARIA-INIA
LABORATORIO DE ANALISIS
ESTACION EXPERIMENTAL ILLPA - PUNO
ANEXO SALCEDO
Ofic. Principal: Av. La Molina 1981 - La Molina Lima



SOLICITANTE
INTERESADO
DIRECCION
PROCEDENCIA

PRODUCTO
TIPO DE ANALISIS
PROFUNDIDAD DE MUESTREO
N° DE ANALISIS
FECHA DE RECEPCIÓN
FECHA DE CERTIFICACIÓN

CERTIFICADO EN ANALISIS

: Jean Ronald Vilcapaza Ccoa.

: Centro Poblado la Rincónada MR. Prov. San Antonio de Putina

: Suelos.

: H°.

: 01.

: 10 de Septiembre del 2018.

: 17 de Septiembre del 2018.

Determinaciones	Sector Antahuila
Humedad %	11.27

Referencias:
Methods of analysis for soils, plants and waters. University of California, Division of Agricultural Sciences E.U.A. Sexta reimpresión, Octubre 1988. 195p.

Conclusiones:
La muestras analizadas de Suelos CUMPLEN con los requisitos de documentos referenciales.

Nota:
Cualquier corrección y/o enmendadura anula al presente documento. (El informe sólo afecta a la muestra sometida a ensayo).



INIA
ESTACION EXPERIMENTAL ILLPA - PUNO


Ing° JORGE CANIHUA ROJAS
Jefe Laboratorio Analisis
SALCEDO

Los resultados son aplicables a esta muestra.

www.inia.gob.pe

Rinconada de Salcedo s/n
Puno, Puno. Perú
T: (051) 363-812 RPM #090829
951112306

ANEXO D. Análisis de densidad aparente del suelo contaminado proveniente de la actividad minera.

SERVICIO NACIONAL DE ANALISIS
DE SUELOS
La Molina
Ministerio de Agricultura
Instituto Nacional de Innovación Agraria
INIA

MINISTERIO DE AGRICULTURA
INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACION AGRARIA-INIA
LABORATORIO DE ANALISIS
ESTACION EXPERIMENTAL ILLPA - PUNO
ANEXO SALCEDO
Ofic. Principal: Av. La Molina 1981 - La Molina Lima

inía
Instituto Nacional de Innovación Agraria
Estación Experimental ILLPA - Puno

CERTIFICADO EN ANALISIS

SOLICITANTE : Jean Ronald Vilcapaza Ccoa.
INTERESADO :
DIRECCION :
PROCEDENCIA : Centro Poblado la Rinconada MR. Prov. San Antonio de Putina
PRODUCTO : Suelos.
TIPO DE ANALISIS : Densidad Aparente.
PROFUNDIDAD DE MUESTREO :
N° DE ANALISIS : 01.
FECHA DE RECEPCIÓN : 10 de Septiembre del 2018.
FECHA DE CERTIFICACIÓN : 17 de Septiembre del 2018.

Determinaciones	Sector Antahuila
Densidad Aparente gr/cc	1,44

Referencias:
Methods of analysis for soils, plants and waters. University of California, Division of Agricultural Sciences E.U.A. Sexta reimpresión, Octubre 1988. 195p.

Conclusiones:
La muestras analizadas de Suelos CUMPLEN con los requisitos de documentos referenciales.

Nota:
Cualquier corrección y/o enmendadura anula al presente documento. (El informe sólo afecta a la muestra sometida a ensayo).

INIA
ESTACION EXPERIMENTAL ILLPA - PUNO

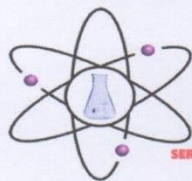
Ing° JORGE CANIHUA ROJAS
Jefe Laboratorio Análisis
S A L C E D O

Los resultados son aplicables a esta muestra.

www.inia.gob.pe

Rinconada de Salcedo s/n
Puno. Puno. Perú
T: (051) 363-812 RPM #090829
951112306

ANEXO E. Análisis de mercurio después del experimento en todos los tratamientos.



RHLAB S.A.C.
SERVICIOS ANALÍTICOS QUÍMICO - METALÚRGICO

RH-M22-098

INFORME DE ENSAYO

DATOS DEL CLIENTE

A SOLICITUD DE : **Bach. Jean Ronald Wilcapaza Ccoa**

ASUNTO : **Determinación Analítica del contenido
Metálico Total en la muestra**

PROCEDENCIA : **Sector Antahuila del Centro Poblado la Rinconada - Puno**

CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES DE LA MUESTRA : **Muestra Inicial**

DENOMINACIÓN DE LA MUESTRA : **20**

CANTIDAD DE MUESTRAS : **Coordenadas 19L0451675
8382020**

UBICACIÓN : **Coordenadas 19L0451675
8382020**

SOLICITUD DE ENSAYO : **Análisis Químico elemento Mercurio (Hg).
Por Reconocimiento**

MOTIVO : **Evaluación de la capacidad fitorremediadora del
garbancillo (*Astragalus arequipensis*) en función de tres
tipos de enmiendas orgánicas sobre la remoción de
mercurio del suelo contaminado por la actividad minera
del Centro Poblado la Rinconada - Región Puno, 2018**

RECEPCION DE MUESTRAS : **Bolsas de Plastico hermeticos, debidamente conservado**

FECHA DE REALIZACION DEL ENSAYO : **08/11/2018 al 12/11/2018**

DETALLE DEL INFORME

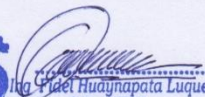
RESULTADO DE ENSAYO

N°	N° RH	Código de Cliente	Hg ppm
1	RH200367	T1-R1	3992.02
2	RH200368	T1-R2	3992.11
3	RH200369	T1-R3	3992.40
4	RH200370	T1-R4	3993.20
5	RH200371	T1-R5	3993.42
6	RH200372	T2-R1	3982.11
7	RH200373	T2-R2	3980.42
8	RH200374	T2-R3	3983.01
9	RH200375	T2-R4	3982.51
10	RH200376	T2-R5	3984.68
11	RH200377	T3-R1	3994.01
12	RH200378	T3-R2	3993.98
13	RH200379	T3-R3	3995.31
14	RH200380	T3-R4	3995.22
15	RH200381	T3-R5	3994.74
16	RH200382	T4-R1	3992.65
17	RH200383	T4-R2	3992.24
18	RH200384	T4-R3	3992.82
19	RH200385	T4-R4	3992.50
20	RH200386	T4-R5	3992.94

Los resultados obtenidos y que se consignan en el presente informe corresponden al ensayo solicitado en las muestras recibidas del cliente.

MÉTODOS DE REFERENCIA

* Determinación de Mercurio (Hg) en muestra sólida - Método Espectrofotometría de Absorción Atómica


Piedad Huaynapata Luque
CIP 167755
GERENTE DE OPERACIONES

Av Martires del 4 de Noviembre N° 2414 (Salida Puno - Frente a Covisur)
Cel: 978645480 - 935008140

MINISTERIO DE AGRICULTURA
INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACIÓN AGRARIA-INIA
LABORATORIO DE ANALISIS
ESTACION EXPERIMENTAL ILLPA - PUNO
ANEXO SALCEDO
Ofic. Principal: Av. La Molina 1981 - La Molina Lima

inia
Instituto Nacional de Innovación Agraria
Estación Experimental Illpa - Puno

CERTIFICADO EN ANALISIS

SOLICITANTE
INTERESADO
DIRECCION
PROCEDENCIA

: Jean Ronald Vilcapaza Ccoa.
: Jean Ronald Vilcapaza Ccoa.

PRODUCTO
TIPO DE ANALISIS

: Textura, Humedad, Da, CE, MO, N, P, K, Reacción del
suelo, CIC.

N° DE ANALISIS
FECHA DE RECEPCIÓN
FECHA DE CERTIFICACIÓN

: 08.
: 08 de Noviembre del 2018.
: 19 de Noviembre del 2018.

N°	CLAVE USUARIO	ANALISIS MECANICO				DA gr/cm³	H° %	pH	CE mmhos/cm 25°C	MO %	N %	K ppm	P ppm	CIC									
		Arena %	Arcilla %	Limo %	Textura																		
1	T3-R5	66	7	27	FA	1,00	19,87	6,20	0,130	1,50	0,06	2248,13	6,20	8,00									
2	T3-R4	59	7	34	FA	1,06	19,19	6,38	0,127	1,48	0,06	1935,35	6,00	7,14									
3	T4-R2	63	7	30	FA	1,01	27,77	6,02	0,200	1,50	0,06	9109,83	5,21	10,00									
4	T2-R3	59	5	36	FA	1,03	25,98	5,98	0,120	1,33	0,05	2815,05	6,95	8,03									
5	T2-R4	57	7	36	FA	1,08	26,55	5,91	0,113	1,48	0,06	2580,46	6,95	8,45									
6	T4-R4	71	9	20	FA	1,00	30,52	6,05	0,100	1,53	0,06	9579,01	5,80	8,11									
7	T1-R2	58	7	35	FA	1,16	31,13	5,65	0,113	1,60	0,06	1387,97	6,50	9,01									
8	T1-R1	58	7	35	FA	1,28	23,26	5,62	0,123	1,48	0,06	1603,01	6,35	8,11									

Conclusiones:

La muestras analizadas de Suelos CUMPLEN con los requisitos de documentos referenciales.

Nota:

Cualquier corrección y/o enmendadura anula al presente documento. (El informe sólo afecta a la muestra sometida a ensayo).

ESTACION EXPERIMENTAL ILLPA - PUNO

Ing° JORGE CARHUA ROJAS
Jefe Laboratorio Analisis
SALCEDO

www.inia.gob.pe

Rinconada de Salcedo s/n
Puno, Puno, Perú
T: (051) 363-812 RPM #090829
951112306

ANEXO G. Panel fotográfico.



Fotografía 1. Panorama de la Zona de estudio para toma de muestras.



Fotografía 2. Profundidad del muestreo



Fotografía 3. Muestreo del suelo contaminado



Fotografía 4. Cuarteador de muestra de suelo



Fotografía 5. Peso de muestra balanza analítica



Fotografía 6. Muestras distribuidas por tratamiento



Fotografía 7. Preparación de las enmiendas org.



Fotografía 8. Especie garbancillo



Fotografía 9. Unidades experimentales



Fotografía 10. Mezclado del suelo con enmiendas.



Fotografía 11. Trasplante del garbancillo



Fotografía 12. Distribución de los tratamientos y repeticiones del experimento



Fotografía 13. Crecimiento del garbancillo



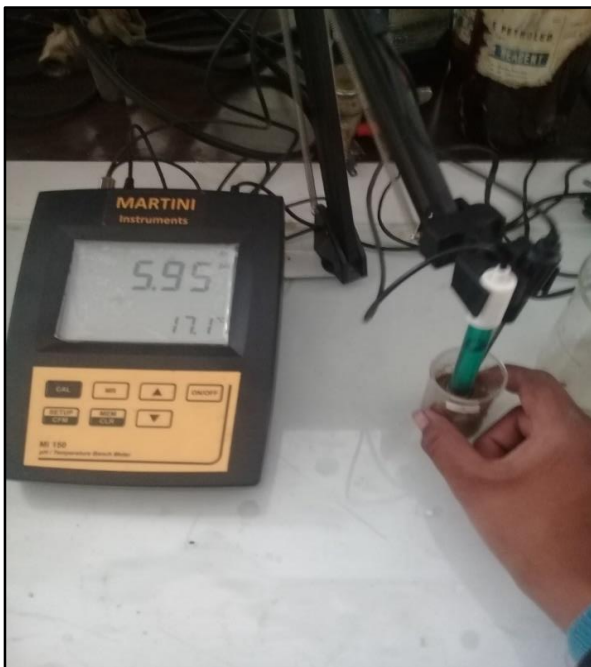
Fotografía 14. Medición de la altura de la planta



Fotografía 15. Especie después del tratamiento



Fotografía 16. Muestras de suelos después del exper.



Fotografía 17. Análisis de pH en el laboratorio del INIA



Fotografía 18. Análisis de CE



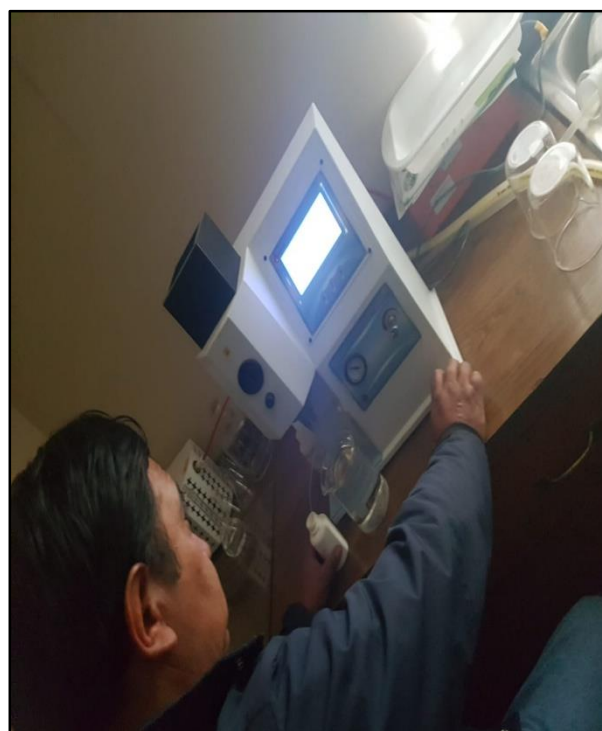
Fotografía 19. Análisis de potasio disponible



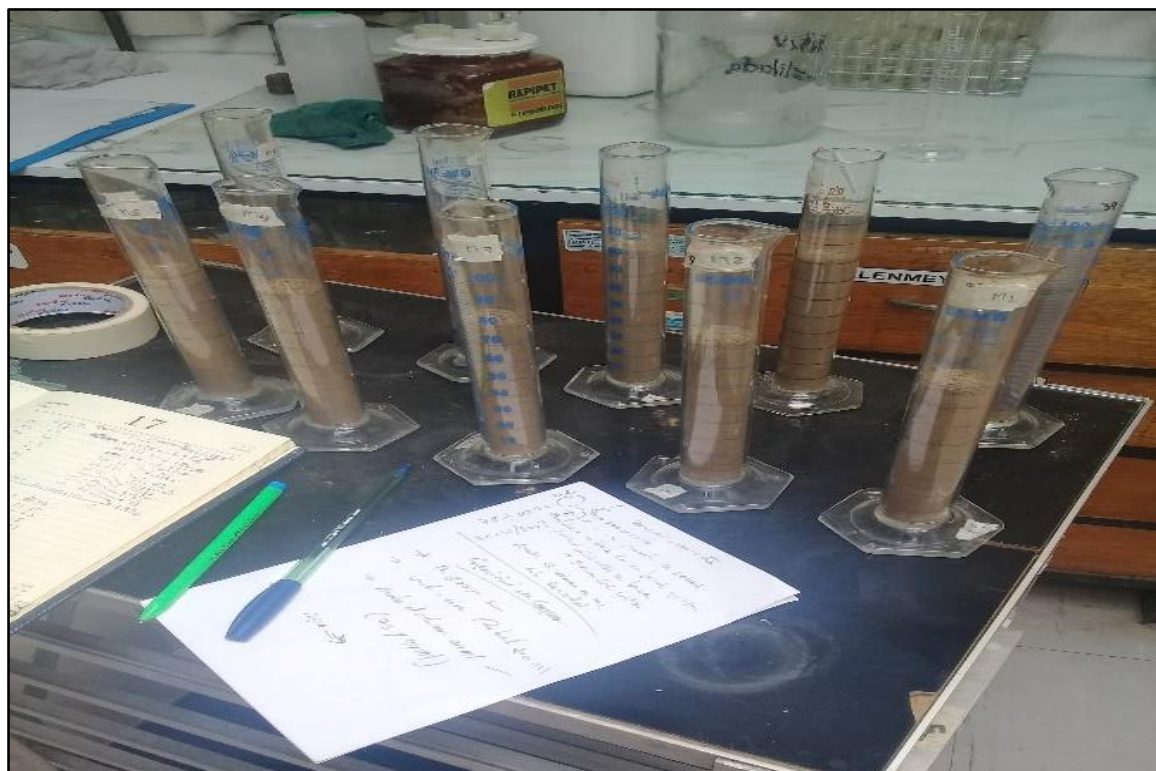
Fotografía 20. Determinación de textura de suelo



Fotografía 21. Agitador Bouyoucos



Fotografía 22. Fotómetro de llama



Fotografía 23. Determinación de densidad aparente del suelo